

直升机特定结构先进陶瓷材料研究进展与应用展望

谌广昌¹, 段小明², 朱金荣¹, 龚情¹, 蔡德龙³, 李宇航⁴,
杨东雷¹, 陈彪¹, 李新民¹, 邓旭东¹, 余瑾¹, 刘博雅¹,
何培刚², 贾德昌², 周玉^{2,5}

(1. 中国直升机设计研究所, 景德镇 333001; 2. 哈尔滨工业大学 特种陶瓷研究所, 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150006; 4. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191; 5. 哈尔滨工业大学(深圳) 材料科学与工程学院, 深圳 518055)

摘要:为进一步拓展先进陶瓷材料在直升机结构领域的应用, 本文对国内外直升机结构用先进陶瓷材料进行了审视和回顾, 重点关注直升机能量冲击防护部位、能量转换部件及腐蚀防护区域等特定结构部位用各类先进陶瓷材料, 对比分析国内外先进陶瓷材料在直升机上述特定结构部位的应用差距, 并提出未来发展建议。高速动态冲击能量防护部位应发展反应烧结曲面一体化成型的非透明装甲陶瓷材料和多晶透明装甲陶瓷材料, 低能量冲击防护部位应发展与环氧树脂基基材兼容的金属陶瓷复合涂层, 热能冲击防护部位应发展陶瓷基/树脂基混杂复合材料(Hybrid Ceramic Matrix Composite/Polymer Matrix Composite, HCMC-PMC), 机械能与电能转换部件应发展以高性能微型压电陶瓷薄膜功能器件及柔性混合电子结构复合材料为代表的多功能复合材料, 电磁能与热能转换部件应发展与环氧树脂基复合材料兼容的纤维增强吸波陶瓷基复合材料, 腐蚀防护区域应发展高性能耐磨腐蚀防护用溶胶-凝胶涂层。同时, 应大力构建直升机装备高速动态能量冲击防护机理及防护材料抗弹击性能优化机制, 并发展垂直起降飞行器多功能复合材料数字试验验证技术, 以显著缩短先进陶瓷材料的研发及装机应用周期并降低验证成本。

关键词: 直升机; 特定结构; 先进陶瓷; 微型压电陶瓷; 多功能复合材料; 数字化试验验证技术; 综述

中图分类号: TB174 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2025)03-0225-20

Advanced Ceramic Materials in Helicopter Special Structures: Research Progress and Application Prospect

CHEN Guangchang¹, DUAN Xiaoming², ZHU Jinrong¹, GONG Qing¹, CAI Delong³, LI Yuhang⁴,
YANG Donglei¹, CHEN Biao¹, LI Xinmin¹, DENG Xudong¹, YU Jin¹,
LIU Boya¹, HE Peigang², JIA Dechang², ZHOU Yu^{2,5}

(1. China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China; 2. Institute for Advanced Ceramics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150006, China; 4. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 5. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China)

Abstract: To further expand the application of advanced ceramic materials in helicopters, this paper reviews their application in helicopter structures both domestically and internationally. It emphasizes the technical maturity and development trends of various ceramic materials in helicopter specific structural applications, such as energy impact

收稿日期: 2024-09-05; 收到修改稿日期: 2024-11-14; 网络出版日期: 2024-11-15

作者简介: 谌广昌(1983-), 男, 博士, 研究员. E-mail: chengc004@avic.com

CHEN Guangchang (1983-), male, PhD, professor. E-mail: chengc004@avic.com

通信作者: 贾德昌, 教授. E-mail: dcjia@hit.edu.cn

JIA Dechang, professor. E-mail: dcjia@hit.edu.cn

protection parts, energy conversion components, and corrosion protection areas. By comparing the gaps between domestic and international use of advanced ceramic materials in helicopter specific structures, the paper provides suggestions for the future development. Recommendations include the use of reaction-sintered contoured integrated opaque armor ceramics and polycrystalline transparent armor ceramics for the high-speed dynamic impact energy protection parts, cermet composite coatings compatible with epoxy resin composite substrates for the low-energy impact protection parts, and hybrid ceramic matrix composite/polymer matrix composite (HCMC-PMC) materials for the thermal shock protection parts. Additionally, multifunctional composite materials, such as high-performance miniature piezoelectric ceramic thin film functional devices and flexible hybrid electronic structures based on micro-piezoelectric ceramic materials, should be developed for the mechanical and electrical energy conversion components. Microwave-absorbing ceramic composites derived from polymer-derived ceramics that are compatible with epoxy resin composite substrates are recommended for the electromagnetic and thermal energy conversion components. Furthermore, high-performance abrasion-resistant and corrosion-resistant Sol-Gel coatings are suggested for the corrosion protection areas. It is also essential to establish a high-speed dynamic energy impact protection mechanism for helicopters, optimize the ballistic performance of protective materials, and develop advanced ceramic materials digital testing and verification technologies, represented by multi-functional composite materials for helicopter specific structures. These efforts will greatly shorten the application cycle of advanced ceramic materials and reduce the verification cost.

Key words: helicopter; specific structure; advanced ceramic; micro-piezoelectric ceramic; multifunctional composite material; digital testing and verification technology; review

先进陶瓷材料具有轻质、高硬度(耐磨)、高熔点(耐高温)、化学稳定性好(耐腐蚀)、高强度、高模量及耐低温等优异性能,在航空发动机轻质高性能热端部件以及热防护系统部件等航空飞行器结构中的应用重要性日益凸显。

随着极端动态冲击环境用材料(Materials in Extreme Dynamic Environment, MEDE)^[1-6]、高效旋翼用形状自适应桨叶(Shape Adaptive Blades for Rotorcraft Efficiency, SABRE)^[7]及 HCMC-PMC 蒙皮^[8]等一系列科研活动的开展,以防弹陶瓷、隔热陶瓷及陶瓷基复合材料等为代表的功能陶瓷材料正广泛应用于直升机能量冲击、热端和腐蚀防护区域结构件^[9-12],以压电陶瓷块、压电陶瓷纤维复合材料等为代表的智能陶瓷材料在直升机结构健康监测及减振降噪等部件中的应用也越来越普及^[13-15]。但航空先进陶瓷材料的成型工艺、组分和微观结构的复杂性和离散性及其相对较低的断裂韧性,是困扰先进陶瓷结构部件设计、验证和寿命的主要挑战,也是限制其在直升机结构领域扩大应用的瓶颈^[16]。

本文回顾和审视了国内外直升机结构用先进陶瓷材料及其性能特征,从材料本征性能、耐久性、工艺性及全生命周期成本等多方面综合考虑,聚焦发现和表征直升机结构特定区域(如能量冲击防护

和能量转换等部位)结构部件所需的先进陶瓷材料赋能技术。

1 直升机结构特定部位对先进陶瓷的应用需求

直升机具有垂直起降、空中悬停、前后左右飞行、近地机动能力强的典型特征,在军用和民用领域发挥着重要作用^[17-20]。军用直升机可执行低空突防、兵力运输等多种军事任务,是现代战争中连接地面与空中体系作战的关键环节。民用直升机可用于医疗救护、旅游观景等多个领域,是通航市场的重要载具。

“一代材料,一代装备”。自 20 世纪 30 年代世界上第一架直升机首飞成功以来,直升机技术大体经历了 5 代的发展阶段,每一代技术的发展均大幅提升了直升机飞行速度并显著降低了振动和噪声水平。这些技术进步均与新材料和新工艺的发展密切相关,如桨叶从最初的木质材料到后来的金属材料再到现在的高性能复合材料,逐步使桨叶获得了无限寿命^[21]。以 AH-64“阿帕奇”直升机为代表的第三代军用直升机,在总结越南战争中美军以 UH-1“休伊”直升机为代表的第二代军用直升机战场损伤经

验的基础上,为提升型号生存力,开始在驾驶舱等人员关键防护部位应用轻质陶瓷防护装甲,促进了轻质陶瓷防护装甲的开发和应用,随后该技术逐步拓展至以坦克地面装备及武装人员防护为代表的其它领域^[22]。

军用直升机作为低空和超低空作战领域的核心力量,随着无线通信手段和自媒体等新型媒介力量的快速发展,低空和超低空战场态势透明度日益提升,同时,以便携式防空导弹为代表的近程防空武器受地缘政治等因素影响呈无序扩散态势。综上,日益透明的作战环境耦合无序扩散的威胁性武器,导致军用直升机装备的生存威胁正日益加倍。以“俄乌冲突”中的军用直升机运用为例,截至目前,俄罗斯空天军用直升机已累计损失60余架,被便携式防空导弹击落的比例高达76%,如图1所示^[23-24]。直升机相比固定翼飞机最大的优势是具备悬停后退等机动飞行能力,且能在小面积场地垂直起降,但这同时意味着直升机相比固定翼飞机面临更加恶劣的服役环境,特别是在高原沙漠地带等简易机场起降过程中容易受到砂石等外来颗粒的低速冲击损伤,如图2所示^[25-26]。综上所述,对于直升机驾驶舱等高速高能量冲击区域,以及旋翼桨叶前缘等高速低能量冲击结构的特定部位,具有高硬度、高模量等特点的轻质防弹陶瓷和陶瓷金属复合涂层等先进陶

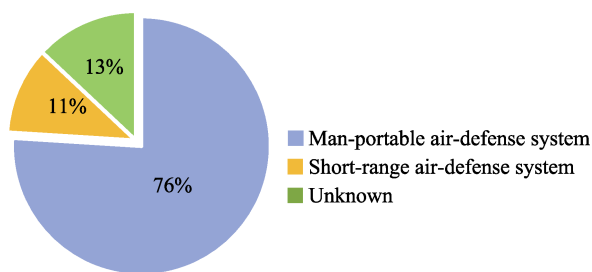


图1 乌克兰战场直升机损伤分析^[23]

Fig. 1 Analysis of rotorcraft combat damage in Ukraine battlefield^[23]



图2 直升机不良目视环境起降^[26]

Fig. 2 Degraded visual environment of helicopter landing and taking off^[26]

瓷材料,是实现能量冲击防护的最佳选择。

直升机结构通常划分为旋翼系统、机体结构和起落架三大类。旋翼系统是直升机的独有部件,是直升机的升力面和操纵面,也是直升机振动和噪声的主要来源。以桨涡干扰(Blade Vortex Interaction, BVI)噪声为代表的旋翼系统气动噪声,因其低频且高能量属性,传播距离极远,是导致直升机隐蔽性下降的主要因素^[27-29];以传动系统和发动机噪声为代表的高频机械啮合/激振力噪声,是影响直升机舒适性并危害机舱内部人员身心健康的重要因素^[30-32]。日益突出的直升机振动问题严重影响了装备重要系统和装备自身安全运行的可靠性^[33-34]。综上,振动和噪声是对直升机装备及其驾乘人员产生一定危害的机械能。基于能量守恒定律,利用压电陶瓷纤维复合材料等先进陶瓷材料,将具备危害性的振动和噪声等机械能转换为电能等有益能量,是实现直升机振动和噪声变害为利的优势方案。同时随着以电驱动垂直起降飞行器(Electrical Vertical Take-off and Landing, E-VTOL)等为代表的新兴航空飞行器的蓬勃发展,具有高室温离子电导率、与锂(Li)金属接触稳定及良好电化学稳定性的陶瓷固态电解质材料在固态锂电池中的应用,具有高导热、高热稳定性和优异耐腐蚀性的陶瓷薄膜复合材料在电池热管理系统中的应用,都将因E-VTOL的需求而迅速发展^[35-36]。

直升机低空低速飞行器的任务特性与高空高速固定翼飞机存在显著区别,主要体现在以下几个方面:飞行高度一般在3000 m以下,甚至在一树之高(15~30 m);巡航速度约280 km/h;舰载直升机常态化低空掠海飞行。因此,直升机的服役环境极其恶劣,主要为湿/热、干/寒、沙尘/雨淋及海水等自然环境条件。这些恶劣的自然服役环境与旋翼和传动两大独有部件诱发的整机复杂疲劳力学环境,是导致直升机旋翼迎风面和机械连接结构等部位外场服役过程中电偶腐蚀现象频发的根本原因,如图3所示^[37-38]。以溶胶-凝胶涂层为代表的有机(聚合物)-无机(陶瓷)杂化材料在具备良好的化学稳定性、绝缘性、腐蚀防护性和绿色环保性的同时兼具聚合物的强韧性和陶瓷的耐磨性,是实现直升机电偶腐蚀耐久性防护的最优方案^[39]。

“需求牵引,技术推动”。综上分析,直升机特定结构部位,如能量冲击防护部位、能量转换部件及腐蚀防护区等,对先进陶瓷材料需求十分迫切。为此,本文重点分析了用于能量冲击防护、能量转换及腐蚀防护的先进陶瓷材料的应用现状和发展趋势。同时,研究了国内外在该领域的差距,明确了直升机



图 3 旋翼连接结构外场腐蚀^[38]
Fig. 3 Field corrosion of rotor connection structures^[38]

特定结构用先进陶瓷材料的发展方向,这对于推动我国直升机装备技术发展具有显著意义。

2 国外技术应用现状与发展趋势

先进陶瓷材料具有高抗剥蚀、高耐磨、高耐温、高介电性、高耐振动性、高耐腐蚀性和高化学稳定性等优异性能,已在轻质装甲防护系统、旋翼刹车与传动系统轴承滚子耐磨部件及发动机整流罩热区蒙皮隔热防护等高低能量冲击部位为代表的直升机关键部件中广泛应用。此外,对于旋翼及传动等直升机高振动易发疲劳失效部件,以振动能与电能相互转换的微型压电陶瓷器件为物质基础的自供电结构健康监测系统已实现工程化应用并逐步拓展。同时,紧固件连接结构及起落架等直升机结构部件由于外露于恶劣自然环境并耦合复杂力学环境,极易产生电偶腐蚀,采用有机-无机杂化的先进陶瓷材料可有效缓解这一问题。综上,先进陶瓷材料在直升机上述特定结构部位的应用取得了显著进展。国外已逐步建立起航空飞行器先进陶瓷材料完整技术体系,主要研发和制造商包括美洲的美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、赛瑞丹(Ceradyne)公司、苏尔梅特(Surmet)公司、美国半导体(American Semiconductor)公司、Luna 创新(Luna Innovations)公司,欧洲的德国航空航天中心(German Aerospace Center, DLR)、荷兰航空航天中心(Netherlands Aerospace Center, NLR)、圣戈班(Saint-Gobain)公司、索科(Socomore)公司等^[40-43]。提供的航空先进陶瓷材料涵盖高性能陶瓷防弹装甲、透明陶瓷装甲、微电子芯片器件用高性能陶瓷晶圆和无机/有机杂化及陶瓷/金属复合涂层等。主要的先进陶瓷材料牌号和生产研发供应商等信息如表 1^[40-43]所示。

从 20 世纪 90 年代开始,欧美主流直升机研发机构基于航空先进陶瓷材料开展了多形式、多部位的直升机特定结构研发应用工作,如 BK117 直升机、EC155 直升机及“清洁天空—绿色旋翼机集成技术演示验证(CLEAN SKY—The Green Rotorcraft Integrated Technology Demonstrator)”项目等^[44-46]。

2.1 应用现状

2.1.1 能量冲击防护用先进陶瓷

2.1.1.1 高速动态能量冲击防护用非透明装甲

军用直升机作为执行低空/超低空战术任务的核心空中平台,在低空低速飞行时易成为敌方多样化武器的打击目标。其面临的威胁包括重机枪、火箭推进榴弹(Rocket-propelled Grenade, RPG)及便携式防空系统(Man-portable Air Defense Systems, MANPADS)。这些威胁严重制约了直升机战场生存力^[47-48]。

相关统计数据表明^[49-50],由于灾难性坠毁引发的伤亡人数超出了直接命中飞机乘员导致的伤亡人数,坠毁已成为直升机人员伤亡的主要原因。为了减少坠毁引发的伤亡,可以采取以下两种主要方法:1)提升直升机的耐坠性;2)对关键部件进行装甲防护,以降低轻武器和自动步枪武器威胁的“廉价杀伤”对直升机关键部件(如被击中可能导致直升机坠毁的部件)的灾难性影响。

基于上述因素,美国陆军航空技术委员会和联合飞机生存力项目办公室联合资助了直升机关键部件防护研究项目^[51],该项目由防护集团(The Protective Group, TPG)公司牵头,联合 M 立方体技术(M Cubed Technologies, MCTs)公司及陆军研究实验室罗格斯大学和约翰霍普金斯大学材料卓越研发中心(Army Research Laboratory Materials Center of Excellence at Rutgers and Johns Hopkins Universities)共同开展。项目围绕 AH-1“眼镜蛇”直升机和 OH-58“基奥瓦”直升机的高易损性关键部件区域开展复杂形状、大曲率、高性能及低成本复合材料装甲研发,聚焦复杂形状整体陶瓷部件的反应烧结和复合材料背板组件的直接集成这两类技术。

表 1 先进陶瓷材料牌号和研制生产商^[40-43]

Table 1 Brands and suppliers of advanced ceramics^[40-43]

Brand	Type	Supplier
Reaction sintering ceramic	Bullet-proof ceramic	M Cubed Technologies
AION	Transparent bullet-proof ceramic	Surmet
Flexible hybrid system	Silicon-based ceramic	American Semiconductor
Gentoo	Sol-Gel coating	Luna Innovations

MCTs 公司作为复杂形状整体陶瓷部件反应烧结的行业引领者,其独有工艺的一项关键优势在于能够制备复杂形状和大型整体陶瓷部件。该工艺能够在需防护的较大区域使用单块“韧性”陶瓷,替代传统防弹陶瓷装甲设计中采用的砖砌拼装结构方法。TPG 公司研发了一种复合材料背板的热压罐工艺。通过独特的材料架构和工艺,该热压罐工艺能够在轻质装甲系统中将装甲的抗弹击性能与大吨位压机制备的装甲抗弹击性能直接集成,显著降低了工装成本。在这一工艺中,使用了刚性系统部件,如采用反应烧结制备的复杂形状整体韧性陶瓷块的陶瓷基装甲体系作为工装。与现有大吨位压机制备工艺相比,该方法不仅缩短了生产周期,还降低了成本和风险。

AH-1 系列直升机曲柄外壳为该型号操纵系统关键部件,若失效将引发操纵系统失效进而导致直升机机毁人亡的灾难性事故。该型号曲柄外壳位于主驾驶座位和副驾驶座位之间的下方位置,基于曲柄外壳关键部件的所处位置及型号的装甲防护需求,采用具有高曲率复杂曲面外形的装甲系统对曲柄外壳进行防护是确保 AH-1 系列直升机生存力的有效手段,如图 4 所示^[51]。基于反应烧结碳化硼(B₄C)整体陶瓷弹击防护面,将热压罐工艺直接集成制造的高曲率复杂曲面外形装甲防护系统成功配装于退出现役的 AH-1S 直升机曲柄外壳部位,并通过了实弹试验验证,如图 5 所示^[51]。由图 5 可知,该装甲防护系统有效防护了多次弹击,且其背板变形尚在允许范围内,没有影响到位于装甲防护系统背面的曲柄外壳。因此,AH-1S 直升机通过实弹试验验证后,美国陆军在其现役 AH-1Z 直升机曲柄外壳部位全面配装了高曲率复杂曲面外形装甲防护系统,并同步推广至 OH-58D 直升机发动机维护口盖部位。

2.1.1.2 高速动态能量冲击防护用透明装甲

直升机驾驶舱是驾驶员的活动空间,透明件作为整体结构部件,安装于直升机前机身,围绕在驾驶员周边,为驾驶员提供了观察外界视野。同时透明件可以有效抵御飞行气流的吹袭和飞鸟撞击等



图 4 曲柄外壳带曲率陶瓷装甲安装示意图^[51]
Fig. 4 Curved ceramic armors of bell crank housing^[51]

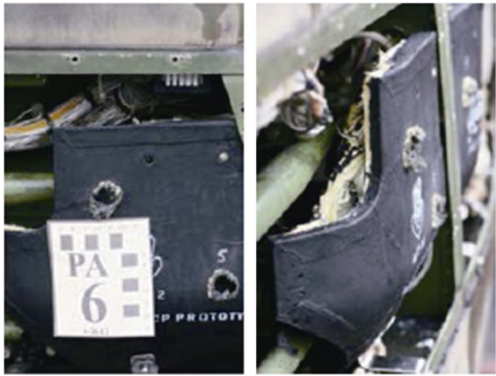


图 5 带曲率陶瓷装甲实弹试验后的照片^[51]
Fig. 5 Photos of curved ceramic armors after firing practice^[51]

外部威胁,是直升机的关键功能结构件,也是高速动态能量冲击损伤的易发区域。因此,具备弹击防护能力的透明件是保证驾驶员生命安全和提升直升机战场生存力的关键基础。

抵御 7.62 和 12.7 mm 口径穿甲燃烧弹的传统防弹玻璃厚度达 100 mm、面密度达 200 kg/m²,这样的厚度和质量对于军用直升机而言均难以承受。相比之下,透明陶瓷材料具有极高的表面硬度,可以在抵御相同弹种攻击时将面密度降低 60%以上,使直升机装备配装防弹透明件成为可能。典型透明防弹材料性能对比分析见表 2^[52-55]。由表 2 可知,AION 透明陶瓷和 MgAl₂O₃透明陶瓷具有远优于传统装甲玻璃的力学性能,欧美工业强国对上述两类材料的研究及其在透明装甲领域工程化应用方面具有较好基础,均在军事装备上实现了规模化应用。Surmet 公司以 AION 透明陶瓷作为迎弹面制备的透明陶瓷装甲产品通过了美国军方苛刻的 ATPD 2352R 的 Class-3A 级验证考核^[56],配装 AH-64“阿帕奇”直升机的防弹透明装甲对 12.7 mm 机枪具备优异的防护能力,其厚度约 40 mm,密度为 56 kg/m³,如图 6 所示^[57]。

综上所述,美国陆军高度重视直升机装备的高速动态能量冲击防护,在积极支持上述高速动态能量冲击防护用产品研究之外,2012 年还发起了一项

表 2 典型透明防弹材料性能对比^[52-55]

Table 2 Performance comparison for typical transparent bullet-proof ceramics ^[52-55]			
Material	AION	MgAl ₂ O ₃	Bullet-proof glass
Density/(g·cm ⁻³)	3.69	3.58	2.50
Young modulus/GPa	334	238	72
Bending strength/MPa	220-550	180-450	50-55
Knoop hardness/GPa	14-18	12-15	5.0-5.5

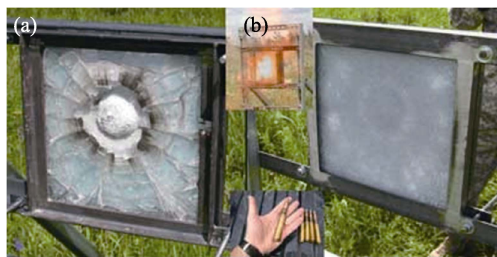


图 6 AlON 透明陶瓷装甲测试(12.7 mm 装甲燃烧弹)后的照片^[57]
Fig. 6 Photos of AlON transparent bullet-proof ceramics after firing practice (12.7 mm armored incendiary bomb)^[57]
(a) Front face of test piece; (b) Back face of test piece

为期 10 年的直升机装备动态能量冲击防护机理及防护材料抗弹击性能优化等方面的基础研究重点项目^[58]。该项目由约翰霍普金斯大学霍普金斯极端材料研究所(Johns Hopkins University Hopkins Extreme Materials Institute, JHU-HEMI)牵头,联合美国陆军实验室(Army Research Lab, ARL)和特拉华州立大学复合材料研究中心(University of Delaware Center for Composite Materials, UOD-CCM)等单位成立了极端动态冲击环境下材料研究中心(Center for Materials in Extreme Dynamic Environments, CMEDE)。其中 JHU-HEMI 负责防弹陶瓷材料防弹机理及材料优化技术研究,选取 B_4C 陶瓷为研究对象,从该陶瓷材料体系的弹击动态失效的机理与控制出发,通过从原子层级到微观结构尺度的多尺度建模、先进陶瓷粉末合成及微观结构改善等方法来提升其在极端动态冲击环境下的抗弹击性能^[59-60]。

2.1.1.3 低能量冲击防护用陶瓷金属复合涂层

与固定翼飞机服役应用场景不同,直升机主要服役于湿/热、干/寒、沙尘/雨淋及海水等恶劣自然环境,且经常在低空和重雨水场条件下进行操作。在直升机起降过程中,旋翼下洗流卷扬地面砂石,在直升机周围形成沙尘环境,对旋翼桨叶产生冲击。旋翼桨叶作为直升机的主要升力面和操纵面,通常采用轻质复合材料制备。然而,复合材料在沙尘、雨滴等低能量冲击下容易诱发内部分层等视觉上不可见的损伤。因此,需要在桨叶复合材料基材表面铺覆耐沙尘和耐雨滴的低能量冲击防护材料。

在直升机旋翼桨叶抗沙尘和雨滴冲蚀材料研发初期,受限于对冲蚀机理的认知,涂层硬度被认为是提高材料抗冲蚀性能的关键因素。20 世纪 70 年代,美俄两国开发出第一代陶瓷抗冲蚀涂层(TiN、CrN 等)并将其应用于多个型号直升机^[61]。随着冲蚀理论的发展,研究人员发现,在防护材料缺陷和脆性断裂敏感的工况下,其韧性变得至关重要,因此转而采用韧性极高的聚氨酯保护带和弹性聚氨酯涂

层体系^[62-64]。

弹性聚氨酯涂层易喷涂、可大面积施工,但不能满足桨叶前缘防雷击设计要求,因此主要用于旋翼桨叶翼面防护。聚氨酯保护带以胶带形式粘贴于旋翼,但在曲面桨叶上的铺贴工艺过程较为复杂,且不能满足直升机桨叶雷击防护设计要求,因此仅用于防护直升机桨叶前缘根部段。基于旋翼桨叶前缘翼型段的雷击及沙尘和雨滴低能量冲击的综合防护需求,采用高比重合金(不锈钢包铁+镍包铁)进行防护。

高比重合金防护材料存在耐腐蚀性较差、比重较高、外场服役耐久性不理想、容易出现包铁脱黏和脱落等现象的缺点。目前航空飞行器发动机转子叶片热防护和低能量冲击综合防护采用了最新一代陶瓷金属复合涂层 BlackGold^[65-67],其兼具轻质、金属的韧性和导电性、陶瓷的硬度和耐腐蚀等特点,是理想的旋翼桨叶前缘防护候选材料。美军正在直升机旋翼桨叶前缘防护上开展工艺适用性验证和导电性提升等研究工作,希望取代现有高比重合金防护材料,实现 50%以上的减重。

2.1.1.4 热能冲击防护用陶瓷基复合材料

与固定翼飞机相比,直升机的发动机排气不产生推力,因此可以充分利用发动机排气的动量,设计波瓣喷管等各种复杂构型的排气系统,增加发动机排气与周围冷空气的接触面积,生成大尺度流向涡,从而在短距离内对发动机排气进行充分渗混降温,降低红外辐射信号强度等。由于直升机的发动机排气温度高达 650 °C,因此排气系统基本上采用高温合金材料制造。然而,采用高温合金制备波瓣喷管等复杂构型排气系统存在如下问题:1)高温合金密度较高,导致排气系统质量较大;2)高温合金无法实现薄壁复杂波瓣喷管结构的整体成型,通常采用分块焊接,这在高温振动环境下容易出现疲劳裂纹;3)高温合金本身不具备隔热性能,需附加隔热材料或部件来抑制热端红外信号。

陶瓷基复合材料具有轻质、耐高温、抗氧化及隔热等优点,是替代直升机发动机排气管用高温合金的理想候选材料。航空飞行器领域热端区域部件常见的陶瓷基复合材料(Al_2O_3f/Al_2O_3 、 $SiCf/SiC$)与高温合金的性能对比分析见表 3^[68-69]。由表 3 可知, Al_2O_3f/Al_2O_3 复合材料,相比高温合金,密度更低、耐温能力更高;相比 $SiCf/SiC$ 复合材料,成本更低、抗氧化性能更好。因此,美军正逐步采用 Al_2O_3f/Al_2O_3 复合材料替代原有高温合金材料制备直升机排气系统^[70-71],具体如图 7 所示。

表3 陶瓷基复合材料与高温合金性能对比^[68-69]Table 3 Performance comparison for ceramic composites and high temperature alloys^[68-69]

Material	Al ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃	SiC _f /SiC	High temperature alloy
Density/(g·cm ⁻³)	2.6-2.8	2.5-2.9	8-9
Oxidation resistance	Good	Moderate	Low
Cost	Low	Moderate	Moderate
Temperature resistance/°C	1100	1200	1050

直升机在飞行状态时, 发动机尾喷管将排出大量的高温废气, 尾喷管排气有向上排气和侧方排气等多种方式。选择向上排气时, 旋翼下洗流将快速吹散高温废气, 同时机身结构如尾段整流罩等可以有效遮挡高温废气引发的红外信号, 显著降低直升机的红外信号特征, 但这种选择会增加直升机的飞行阻力。选择侧方排气时, 高温废气气流将沿机身周边排出, 不会增大气动阻力, 但红外信号特征明显增强。不管选择何种排气方式, 都必须考虑高温废气对周边机身结构的高温侵袭。

受发动机尾喷管高温废气侵袭的机体结构部位主要有发动机整流罩和尾段, 通常采用环氧树脂基或双马树脂基复合材料制备上述部位蒙皮。环氧树脂基和双马树脂基复合材料玻璃化转变温度分别在 120 和 260 °C 左右, 当其长期暴露于高温废气侵袭环境中时, 热软化或其他退化效应将导致热应力裂纹扩展至失效, 不适用于热区。另外, 针对舰载直升机, 发动机整流罩和尾段部位将直接暴露于紫外光辐照、高盐和高湿度等复杂自然环境下, 树脂基复合材料的化学稳定性较差, 上述部位容易出现粉化现象。

为解决树脂基复合材料在高温废气环境下应用于舰载直升机发动机整流罩和尾段蒙皮的局限性, 美国海军针对新研制的 CH-53K“超重马”重型运输直升机, 于 2021 年在中小企业创新研究(Small Business Innovation Research, SBIR)专项中发起了 HCMC-PMC 蒙皮项目^[8]。该项目旨在利用陶瓷基复合材料的耐热、化学稳定和耐磨等优良特性, 将其作为混合复合材料蒙皮的热防护层。这种热防护层

图7 轻型直升机 Al₂O₃f/Al₂O₃ 复合材料尾喷管^[70]Fig. 7 Al₂O₃f/Al₂O₃ composite exhaust of light helicopter^[70]

相比金属热屏蔽材料在减重和减厚方面具有优势, 且相比附加隔热涂层具有更好的结合力和耐久性, 从而在寄生厚度和结构附加质量代价最小化的情况下, 保持了混合复合材料蒙皮中树脂基复合材料承载层的结构完整性。该项目由美国 Triton Systems 公司承担, 目前已完成了直升机振动环境下的热防护地面试验验证。

2.1.2 能量转换部件用先进陶瓷

2.1.2.1 电能转换至机械能用先进陶瓷

直升机振动载荷控制是直升机技术发展进程中极其重要的研究课题。旋翼系统是直升机核心系统之一, 也是直升机振动的主要来源, 因此对旋翼系统采取减振措施十分必要也非常有效。

旋翼减振技术包括桨毂动力吸振、主减隔振等被动式减振和高阶谐波控制(High-order Harmonic Control, HHC)、单片桨叶控制(Independent Blade Control, IBC)、主动襟翼控制(Active Flap Control, AFC)和主动扭转旋翼(Active Twist Rotor, ATR)等主动式减振^[72-74]。被动式减振虽然原理简单、可靠性较好且不需要输入额外能量, 但其工作频率带宽较窄, 只能针对几个固定频率的振动载荷进行振动控制。近年来随着共轴高速、倾转旋翼等新构型高速直升机技术的发展, 对直升机振动水平的限制要求越来越高, 传统的被动式减振已难以满足直升机技术发展需求。旋翼振动主动控制技术相比于被动式减振措施具有更显著的减振效果和更宽的工作带宽, 但 HHC 和 IBC 方法需要在直升机自动倾斜器和变距小拉杆上安装作动器, 这导致机械结构体积增大, 整体质量增加^[75-76]。因此, 旋翼减振技术的工程化研究主要集中在主动襟翼控制和主动扭转旋翼。

主动襟翼控制通过在桨叶内部预埋压电陶瓷驱动器, 利用驱动机构控制桨叶升力展向分布及周期的时变特性, 从而实现旋翼减振。由于该方法在结构和驱动条件上相对容易实现, 自 20 世纪 90 年代起, 欧美研究机构对此开展了大量研究。

压电陶瓷具有电能至机械能转换效率高、稳定性和可靠性高等优异性能, 是一种常用的智能材料^[77]。1999 年, 波音公司开展了基于压电陶瓷智能材料作动器的旋翼技术(Smart Material Actuated Rotor Technology, SMART)项目^[78-79], 以 MD900 无轴承旋翼为基础改进设计, 后缘襟翼采用嵌入式双 X 型机构的压电陶瓷驱动器进行驱动, 如图 8(a)所示。风洞实验表明, 基于反馈控制的后缘襟翼对垂向振动载荷的控制非常有效, 平飞和下降状态下 1~5 阶次谐波的振动可降低 95%。2005 年, 欧直公司开展了

自适应动力学系统(Adaptive Dynamic System, ADASYS)旋翼项目^[80-81], 该项目以 BK117 直升机旋翼为基础, 每片桨叶在三个位置模块化安装分离式后缘襟翼, 分别用压电陶瓷堆菱形机构驱动, 实现了分离式后缘襟翼智能旋翼直升机首次试飞, 如图 8(b)所示, 平飞状态下减振效果达到 50%~90%。

分离式后缘襟翼智能旋翼飞行试验的成功, 证明了主动襟翼控制应用于直升机振动主动控制的可行性。分离式后缘襟翼驱动机构的主要形式包括压电陶瓷叠堆 L-L 结构、双 X 型结构、压电堆菱形框结构等, 典型产品有法国 CRDRAT 技术公司的 APA1000XL, 如图 9 所示^[82]。

分离式后缘襟翼多采用结构质量大、体积大的压电堆驱动, 在细长的桨叶中布置这些驱动装置时, 需要考虑多种因素, 如空间尺寸的限制、桨叶的动力学问题、强离心力场下驱动机构的可靠性等。压电陶瓷宏观纤维复合材料(Macro Fibrous Composite, MFC)等智能材料的发展为后缘襟翼的设计带来了新的技术解决途径^[83]。采用压电陶瓷薄片制备压电纤维的 MFC 激励器具有较高的应变能密度、较长的使用寿命及良好的方向性。其特点包括厚度薄、质量小、柔韧性好和输出功率大, 能够通过叠加多层粘贴在基体上来增加襟翼偏转刚度和偏转位移, 同时也可布置在曲面结构中, 成为一种性能优良的压电激励器。由 MFC 激励器驱动的后缘襟翼可实现与桨叶整体设计与加工。2012 年, 美国陆军实验室等研究机构利用 MFC 作为驱动材料, 基于 VR-18 翼型设计了连续后缘襟翼, 开展了变形控制、低速风洞及数值仿真等大量研究^[84-85], 如图 10 所示。在静

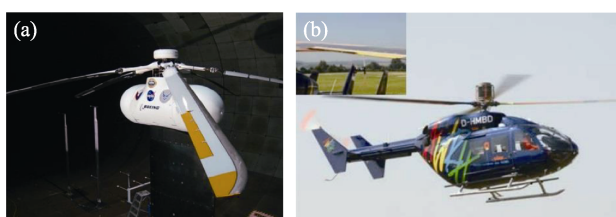


图 8 分离式后缘襟翼智能旋翼^[78, 81]

Fig. 8 Smart rotor based discontinuous trailing-edge flap^[78, 81]
(a) Boeing SMART rotor; (b) Euro-copter ADASYS rotor

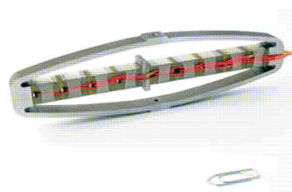


图 9 CRDRAT 技术公司的 APA1000XL 压电陶瓷驱动器^[82]
Fig. 9 APA1000XL piezoelectric actuator from CRDRAT Technologies corporation^[82]

态+750 V 的电压作用下, 与原状态模型桨叶相比, 连续后缘襟翼模型桨叶段的弯曲角度提升超过 63%^[86]。

主动扭转旋翼利用在旋翼桨叶蒙皮上铺覆的各向异性压电应变片, 在电压驱动下沿桨叶展向引入的扭转扭矩, 使旋翼桨叶发生扭转变形, 进而优化桨叶气动载荷, 实现减振。其优势在于采用的压电驱动系统复杂性较低, 不涉及机械部件, 质量轻, 且保证了桨叶的表面非常光滑。欧美从 20 世纪 90 年代起就对此开展了大量研究。

1999 年, NASA/美国陆军(US. Army)/麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)联合首次开展了 ATR 项目研究^[87], 压电陶瓷材料采用主动纤维复合材料(Active Fibrous Composite, AFC)和 MFC。2003 年, 在总结 ATR 项目基础上, 基于压电陶瓷单晶微细纤维复合材料(单晶 MFC)开展了先进主动扭转旋翼(Advanced Active Twist Rotor, AATR)项目研究, 实现了在较低输入电压下的更高扭转驱动^[88]。

2007 年, DLR 和法国国家航空研究中心(French National Aerospace Research Center, ONERA)联合开展了主动扭转智能旋翼(Smart Twisting Active Rotor, STAR)项目^[89-90], 构建了具备主动扭转能力的马赫数缩比模型旋翼。项目实施过程中陆续新增了德荷风洞试验室(German-Dutch Wind Tunnel, DNW)、NASA、US. Army、韩国建国大学(Konkuk University)、韩国航空研究院(Korea Aerospace Research Institute, KARI)、日本航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)、格拉斯哥大学(University of Glasgow)等多个参研单位。

2013 年, STAR 桨叶风洞试验结束前, 模型桨叶应变对激励器造成了较大压力, 导致激励器压电陶瓷纤维内部出现大量局部裂纹。同时激励器运行电压(500~1500 V)过高, 这为后续工程化带来了有效绝缘以及电火花隐患等安全问题^[91]。

针对 STAR 模型桨叶出现的压电陶瓷激励器运行电压过高及压电陶瓷纤维内部因模型桨叶应变大而出現的局部裂纹等问题, 2014 年, DLR 在洁净天

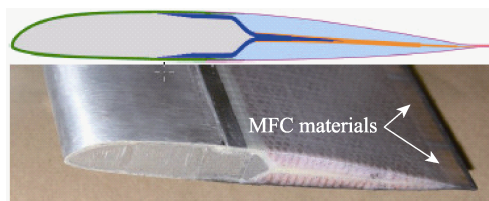


图 10 基于 MFC 的连续后缘襟翼结构及风洞试验件^[84]

Fig. 10 Baseline continuous trailing edge flap airfoil layout and wind tunnel test article based on MFC materials^[84]

空联合技术支持—绿色旋翼机创新旋翼桨叶(CLEAN SKY Joint Technology Initiative—GRC1 Innovative Rotor Blades)项目^[92]支持下, 牵头开展了低电压激励系统研制工作。低电压激励系统采用单晶 MFC 制备多层堆叠 MFC, 在降低压电激励器电压的同时保证其产生的主动扭转应变不减小。试验结果表明, 新研制的低电压激励系统能够在模型桨叶所承受的实际离心力载荷下运行。与原有高电压激励器(运行电压 500~1500 V)相比, 新研制的低电压激励系统运行电压为-20~120 V, 且在激励区域内存在较高的主动扭转性能^[93-94]。

在低电压激励系统具备可行性后, 自 2017 年起, DLR 牵头重新设计研制 STAR 模型桨叶, 采用碳纤维增强复合材料单向带对模型桨叶后缘区域进行加固, 同时采用碳纤维增强复合材料单向带代替玻璃纤维增强复合材料单向带制备模型桨叶大梁, 从而将模型桨叶的总体应变降低至激励器压电陶瓷纤维的可承受层级。随后, DLR 于 2022 年和 2023 年开展了全新设计的 STAR 单片桨叶和整套旋翼的旋翼塔试验^[95]。结果表明, 与 AATR 桨叶相比, STAR 桨叶扭转效率提高了一倍, 并在相同输入电压下实现了两倍的扭转。

综上所述, 主动襟翼控制和主动扭转旋翼的发展都与压电陶瓷材料的进步密切相关, 其经历了锆钛酸铅(Pb-based Zirconate Titanate, PZT)®AFC®MFC®单晶 MFC®多层堆叠 MFC 的发展历程。这一系列进展持续改善了压电陶瓷材料结构性能(如提高许用应变等), 提升了压电陶瓷材料驱动效能(如降低驱动电压和提高同一输入电压下的单位面积主动扭转角等), 同时减小了压电陶瓷激励器对桨叶结构的寄生质量和附加厚度。

2.1.2.2 机械能转换至电能用先进陶瓷

确保型号服役安全是直升机设计研发过程中的重要主题, 随着微型传感器技术的不断进步, 直升机健康监测系统(Health and Usage Monitoring System, HUMS)技术也日趋成熟, 包括直升机旋翼和结构健康监测。这些技术通过实时监控旋翼及关键结构点的振动和力学特性, 以保障直升机服役安全。

陶瓷材料因其耐高温、耐腐蚀、高精度、稳定性和可靠性好等优异性能, 可作为各类传感器和探测器的核心材料。基于压电陶瓷传感阵列与金属或树脂基复合材料一体化集成的微型传感器和微电子设备的最新发展^[96-97], 研发面向工程化应用的新一代自供电无线传感器网络(Self-powering Wireless Sensor Network, SPWSN)用于直升机关键结构 HUMS 成为可能。SPWSN 通过能量收集器为传感

器提供必要的功率, 在直升机关键动部件难以安装线缆线束的部位实现了性能监测, 避免了传统 HUMS 中复杂且质量较大的集流环电连接装置或相对笨重的电池系统。SPWSN 通过收集直升机全生命周期内关键结构部件的服役应变、载荷、扭矩、振动和温度数据, 有效预测关键结构件的剩余寿命, 降低维护成本, 提高型号出勤率, 并提升型号安全性^[98]。

直升机特有的旋翼和传动装置导致其振动水平较高, 这为振动能量收集器的应用提供了良好条件。振动能量收集器主要包括电磁、静电及压电等类型。在基于 SPWSN 的 HUMS 中, 振动能量收集器的安装空间有限, 电磁振动能量收集器的旋转线圈数量较少, 导致输出能量幅值较低。静电振动能量收集器的单位能量密度也较小(见表 4)^[99], 难以满足无线传感器运行功率需求。由表 4 可知, 压电振动能量收集器具有最高能量密度, 且 MFC 压电振动能量收集器在提供必要柔韧性的同时, 无需牺牲电荷常数和机电耦合常数。MFC 压电振动能量收集器的高机电耦合效率和极薄厚度, 使其成为与直升机流线型结构融合的最佳选择。

自 21 世纪以来, 基于 MFC 压电振动能量收集器的 SPWSN HUMS 因其显著的技术优势, 受到欧美直升机强国的广泛研究。洛德微应变传感系统(Lord-Microstrain Sensing Systems)公司在美国海军、贝尔(Bell)直升机公司、西科斯基(Sikorsky)直升机公司及阿古斯塔韦斯特兰(Augusta Westland)直升机公司的大力支持下, 分别于 2007 年、2009 年和 2010 年实现了该技术在 Bell 412 型直升机和 Sikorsky HH-60“海鹰”直升机变距拉杆及 AW139 直升机主旋翼 HUMS 中的应用^[100-102]。Bell 412 型直升机变距拉杆可实时追踪旋翼动部件关键结构的动态载荷和结构剩余寿命^[100], 如图 11 所示。然而, 由于当时压电振动能量收集器输出功率的技术限制, 传感器数据采集周期设定为每停顿 5 s 后启动 1 s, 以平衡无线电传感器等电子设备能量消耗与压电能量收集器能量供应^[100]。因此, 为实现直升机旋翼动部件关键结构更加精确的视情维护 and 健康管理预测, 需要

表 4 3 种主要振动能量收集器的能量密度对比^[99]
Table 4 Comparison of energy density for three major vibration energy harvesters^[99]

Type	Electromagnetic	Electrostatic	Piezoelectric
Energy density/ (mJ·cm ⁻³)	24.8	4	35.4
Assumption	0.25 T magnetic field	3×10 ⁷ V·m ⁻¹ electric field	PZT 5H material

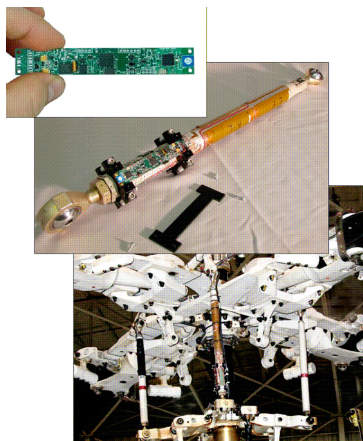


图 11 Lord-Microstrain Sensing Systems 公司的 Bell 412 型变距拉杆在自供电无线传感器中的应用^[100]

Fig. 11 Self-powering wireless sensor package based on Bell 412 pitch links from Lord-Microstrain Sensing Systems corporation^[100]

更高的数据采集速率,直至实现实时连续数据采集。

自 2013 年起,美国海军以 CH-53K 重型直升机旋翼系统和 V-22 旋翼机机翼等关键结构为应用背景,在 SBIR 专项中持续支持 Redondo Optics 公司开展基于能量收集器的 SPWSN HUMS 研发及性能提升^[103-107]。

针对微型传感器电子设备和能量收集器的研发主要聚焦以下关键技术:一是采用新型光纤电子功能陶瓷材料,以持续降低微型传感器等电子设备能量消耗,从而开发出超低能量消耗的无线电子设备;二是提升 MFC 振动能量收集器的能量密度和半功率带宽等性能;三是集成光电能量收集器、热电能量收集器等补充能量收集方式;四是发展微型(1 cm^2)光子集成电路微芯片单片集成技术,实现单片集成光纤解调系统中所有主被动光电子器件;五是將 PZT 激励器与光纤(Fiber Optic, FO)传感器一体化集成,形成超低能量消耗、轻量化、微型尺寸、分布式的“压电/光纤”声学-超声传感器网络。

随着上述材料关键技术的逐步突破,一项最新成果显示多通道光纤解调系统(Multi-channel Optical Interrogation System, MOFISTM)^[106]能够与旋翼桨叶原位集成,系统总质量 $<300\text{ g}$ 、体积 $<200\text{ cm}^3$,实现了超低能量消耗($\leq 1\text{ W}$, 额定电压为 3.7 V 时电流为 300 mA)和基于能量收集器的自供电。通过对光纤光栅传感器高密度列阵的信号解调,系统能够测量与复合材料桨叶结构内过载、疲劳和结构损伤相关联的应变、温度、振动和冲击等多个参数。

综上所述,SPWSN HUMS 是直升机关键部件发展的必然趋势,其中 MFC 压电振动能量收集器是 SPWSN 的主要能量来源。未来的发展方向应集中

在激励器、传感器、解调器、控制器和能量收集器的微型一体化集成,以持续降低电子设备能量消耗,并提升 MFC 压电振动能量收集器的压电转换效率。

2.1.2.3 电磁能/机械能至热能转换用先进陶瓷

雷达隐身性能是军用直升机设计要求的重要指标,旋翼是直升机重要的雷达波强散射源之一。由于桨叶高速旋转及其与雷达入射波方向的径向运动等特征,旋翼的雷达散射截面呈现动态的非线性变化,并伴随强烈的微多普勒调制雷达回波,易被检测和跟踪。因此,为改善旋翼桨叶的雷达隐身性能,除了采用桨尖修形等旋翼结构外形优化设计以降低雷达发现概率外,还可以在桨叶表面使用复合材料或涂覆吸波介质,以进一步减少雷达反射波。

当前隐身飞机雷达吸波复合材料和涂层存在的主要问题是其在盐雾、湿气和磨损等服役环境下,性能会快速下降,甚至出现剥落现象。为解决此问题,北卡罗莱纳州立大学 Xu 教授团队在美国空军科技办公室的资助下,开展了隐身飞机用高韧性、长耐久性吸波复合材料蒙皮的技术研究^[108-111]。该技术方案致力于发展基于碳纳米管增强的氧化锆陶瓷纤维增强聚合物混合 SiCN 陶瓷基复合材料,该材料能够有效将雷达电磁波能量转化为热能消耗,同时具有轻质、高强、耐高温、耐环境及耐久性等优异性能。此材料体系与直升机旋翼桨叶在高速旋转和恶劣服役环境下对雷达吸波材料的需求高度吻合。

直升机旋翼刹车的主要功能是在直升机着陆后停转旋翼,或在快速转运乘客的特定情境下保持发动机最低转速运转。旋翼刹车装置通常由金属刹车盘与摩擦副材料组成。为实现旋翼刹车装置的轻量化、低磨损、长寿命、耐环境及快速制动响应等目标,金属刹车盘材料经历了钢合金到钛合金的发展,而摩擦副材料经历了有机黏结剂材料→粉末冶金材料→碳/碳(C/C)复合材料→碳陶(C/C-SiC)复合材料的发展历程。

相比 C/C 复合材料, C/C-SiC 复合材料在其基材中引入 SiC 陶瓷材料,能够有效提升硬度和热稳定性,同时降低化学活性,从而有效改善旋翼刹车摩擦副材料的耐磨损性能和耐久性^[112]。根据空客公司(Airbus Corporation)2024 年版本的供应商目录^[113], RF0221 旋翼刹车装置由美国柯林斯航空(Collins Aerospace)公司下属法国分公司菲亚特艾维欧(Ratier-Figeac SA)供应,如图 12 所示,采用钛合金金属刹车盘和 C/C-SiC 摩擦副材料制造^[114]。

2.1.3 腐蚀防护区域用先进陶瓷

直升机等航空飞行器作为大型机械工业产品,结构复杂且集成度高,通常采用机械连接、胶接或

图 12 RF0221 旋翼刹车装置^[114]Fig. 12 RF0221 rotor brake^[114]

附加螺栓螺母紧固件等形式连接主要结构,所需紧固件数量大且种类多。然而,由于装配间隙、异种材料接触及服役过程中直升机动部件振动造成的表面防护层损伤等,紧固件与基体之间极易发生电偶腐蚀。这种腐蚀不仅增加了直升机的维护成本,而且增大了事故风险,严重影响型号正常使用与安全寿命。此外,直升机服役环境复杂,面临高温、高湿和高盐雾等挑战,因此解决紧固件的腐蚀问题对提升直升机的服役状态、安全性和使用寿命具有重要意义。

美国 Luna 创新公司研发的 Gentoo 溶胶-凝胶涂层是一种有机(聚合物)-无机(陶瓷)杂化复合涂层,该杂化涂层兼具高硬度、高强度、高耐磨及高韧性等优异性能,能够在螺栓螺母紧固件和机体结构基材之间提供一层致密且持久的电绝缘涂层,有效防止水和腐蚀离子侵入,从而达到极佳的腐蚀防护效果。经验证,该杂化涂层可有效抑制钛合金、不锈钢等紧固件材质与飞机机身不同基材之间的电偶腐蚀,现已应用于美军多个海军型号的直升机连接结构中。保守估计其投入应用后每年可为美国海军节省 1000~3000 万美元的腐蚀维护成本,并有效延长型号的整体使用寿命、提高飞行安全。美国海军目前正开展在海军飞机起落架内套筒等磨损易腐蚀部位上的拓展性应用改进研究。

2.2 发展趋势

综合近年来国外先进直升机特定结构的先进高性能陶瓷应用情况,可以看出,未来先进陶瓷材料在直升机智能化、绿色新能源化以及低成本可消耗转型发展中的重要性将愈加显著。未来直升机特定结构用先进陶瓷材料将朝向轻质低成本、复合高韧性和微型多功能方向协调发展。

(1) 轻质低成本化

在现代战争的复杂环境中,军用直升机作为低空/超低空作战的中坚力量,其重要性日益凸显,然而也面临严峻的生存挑战。提升直升机的生存能力

已成为当务之急。美军提出“体系技术”概念^[115],强调利用有人和无人系统协同作业,构建以认知升级为核心的防护网络,以显著增强直升机的生存能力。这不仅提升了直升机的机动性和侦察打击能力,还增强了其防护水平,提高了后勤保障效率,促进有人及无人系统的深度协同。

在推进智能化系统和远程打击武器研发的同时,针对直升机平台自身,还应优化升级轻质防护装甲,以及从单一座椅防护扩展至驾驶舱、乘员舱的地板和侧面等关键部位防护,以增强整体防护性能。但是防护部位的应用扩展必将带来结构自身质量的增加,进而影响型号有效商用载荷及航程等飞行性能。因此,为解决型号防护装甲与飞行性能之间的矛盾,防护装甲须向轻量化和复合化方向发展,采用梯度功能陶瓷、改性韧化陶瓷以及多种材料复合结构等新型轻质高强防护材料将是有效解决之道。

(2) 复合高韧性化

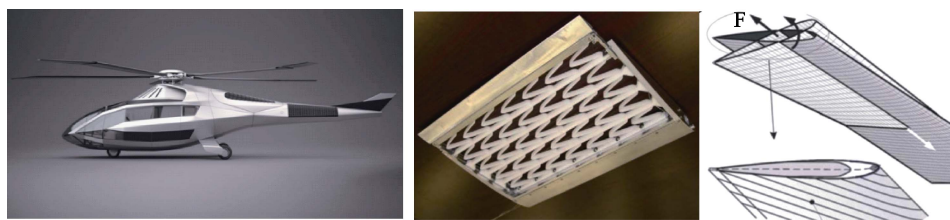
针对航空陶瓷材料相对较低的断裂韧性,开展高韧性化研究,通过与金属、非金属及复合材料的组合实现优势互补。例如,陶瓷-金属复合材料结合了陶瓷的轻质、硬度和耐腐蚀与金属的韧性和导电性;陶瓷-有机聚合物复合材料则将陶瓷材料的耐磨性和有机聚合物的柔性及黏性等相结合;陶瓷-树脂基复合材料结合了陶瓷基复合材料耐热、耐磨、优异的化学稳定性与树脂基复合材料的轻质、可承载能力等,从而有效克服先进陶瓷部件应用中的瓶颈,进一步拓展其在直升机特定结构中的应用。

(3) 微型多功能化

智能化是未来直升机的重要特征之一,也是其技术发展的重要方向。美国贝尔公司提出了 FCX-001 未来直升机概念方案,利用智能变形旋翼技术结合大数据、机器学习及智能材料,实现了旋翼桨叶在不同飞行环境和状态下的主动变形,如图 13 所示^[17]。

北约组织在 2023 年编制的《未来军用直升机:乌克兰战场上启发的技术创新和经验教训》(Future Military Helicopters: Technological Innovation and Lessons Learned from Ukraine)报告^[23]中,总结了俄乌冲突中军用直升机运用的作战经验与教训,给出了北约成员国对未来军用直升机技术创新发展的举措。美军界定的未来军用直升机三大赋能技术包括模块化开放式系统架构、视情维护及空中发射效应。其中视情维护技术的进步高度依赖于直升机结构健康监测技术的发展。

智能旋翼和直升机结构健康监测技术的发展,必将基于实现结构承载、自供电、自传感、自控制和自激励的多功能复合结构^[116]。多功能复合结构的

图 13 未来直升机概念 FCX-001 及智能旋翼技术^[17]Fig. 13 Sketchs of future helicopter FCX-001 and smart morphing rotor^[17]

技术进步与压电陶瓷材料微型化密切相关, 基于微型化压电陶瓷材料的能量收集器、传感器、控制器和激励器可与结构复合材料一体化制备, 从而在不影响结构材料性能的前提下提升其功能性。目前, 微型压电陶瓷材料的多功能复合材料研制和应用已成为欧美航空业研究热点。研发柔性混合电子结构复合材料, 实现智能旋翼桨叶外形的实时变化, 将极大提升直升机的性能, 并实现直升机动部件结构状态的自动感知, 解决直升机结构动部件疲劳预测难题, 满足未来垂直起降飞行器的“无疲劳”及“零维护”需求^[117]。

3 国内技术应用现状与差距分析

直升机技术发展需求推动了材料技术的进步, 而材料技术的提升又促进了直升机技术的持续优化。未来, 直升机向垂直起降飞行器转型的产业化趋势日益明显, 这类飞行器的技术发展特征包括高速化、电动化、智能化、绿色环保和低成本化等, 其中, 以信息功能陶瓷材料、硅基多材料体系融合集成和超宽禁带半导体材料等为代表的新型特种功能材料, 将是未来垂直起降飞行器电动化、智能化、绿色环保和低成本的关键技术。

3.1 应用现状

3.1.1 能量冲击防护用先进陶瓷材料

3.1.1.1 高速动态能量冲击防护用非透明装甲

目前, 国内最成熟的轻质装甲主要是 B_4C 陶瓷复合装甲, 采用高硬度的 B_4C 陶瓷板作为面板, 钝化、磨损或碎化弹头; 韧性背板(如凯夫拉纤维防弹布、高分子量聚乙烯布以及碳纤维增强环氧等)则通过变形吸收弹丸和面板碎片的残余动能, 以防止弹丸侵彻。随着装甲轻量化和高效化的需求上升, 陶瓷复合装甲的优越性日益凸显, 新型复合陶瓷防弹板的抗弹性能比传统均质装甲有显著提升, 这主要得益于材料性能的提升及各组分材料抗弹效应的协同效应。

中国航发北京航空材料研究院武岳等^[118]对直

升机陶瓷复合装甲发展现状及其新型材料应用前景进行了展望, 指出石墨烯等掺杂改性陶瓷和功能梯度陶瓷将成为未来重点研究对象。哈尔滨工业大学特种陶瓷研究所团队在 B_4C 陶瓷烧结与韧性改良等方面取得了一系列突破性进展, 实现了高韧性 B_4C 陶瓷的低温制备^[119]。在此基础上, 开发了加工性能优异的 B_4C 复相陶瓷体系, 通过引入 TiB_2 , 使 B_4C 陶瓷的电导率显著提升, 满足了电火花线切割加工的要求, 有效克服了传统 B_4C 陶瓷加工性问题^[120]。此外, 受贝壳层状结构启发, 该团队还开发了 B_4C-TiB_2/BN 层状陶瓷复合材料, 该材料交替硬质和软质层的结构能够对动态冲击波进行高效吸收和分散, 有效阻止裂纹扩展, 大幅增强 B_4C 陶瓷在高速冲击下的防护能力与可靠性^[121]。该团队研制的 BJ-R 型复合装甲材料经受了 12.7 mm、0° 攻角穿甲燃烧弹攻击, 弹道冲击后装甲背面形变低于 30 mm; BJ-C 型复合装甲材料则能够抵挡 7.62 mm、0° 攻角、15 m 距离下连续 3 发穿甲燃烧弹攻击, 弹道冲击后装甲背面形变低于 20 mm。

对于防弹陶瓷, 其动态冲击环境下的失效行为具有很强的路径和时间依赖性。哈尔滨工业大学特种陶瓷研究所团队通过开发基于多个物理过程和微观结构(烧结、固化、相变和晶粒生长动力学)的混合模型, 结合机器学习方法中的人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)构建数据驱动的结构-性能模型, 并利用沙普利加法解释(Shapley Additive exPlanations, SHAP)定量分析各微观结构特征对于陶瓷材料力学性能提升的贡献。这一混合模型能够系统揭示陶瓷材料制备工艺、显微结构与性能之间的关系, 有助于优化设计具有特定微观结构特征和力学性能的陶瓷材料。该团队正将这种方法应用于 B_4C 陶瓷的设计、制备和性能优化, 以揭示其在使役环境下的动态失效行为与机理, 并通过多尺度建模、高性能粉体合成、晶体结构调控和显微组织优化等手段, 在原子、纳米、微米等尺度上对 B_4C 陶瓷的目标性能进行反向优化设计, 从而提高其在动态冲击环境下的服役性能。

3.1.1.2 高速动态能量冲击防护用透明装甲

透明陶瓷装甲作为一种高性能防护材料,主要用于直升机中保障乘员安全与良好的视野,例如驾驶舱风挡和观察窗、各种传感器和摄像头防护罩等。与传统的防弹玻璃相比,透明陶瓷装甲的密度更低,在相同防护等级下质量更轻;此外,透明陶瓷装甲通常具备优异的耐高温和化学稳定性,能够在极端环境中保持良好性能。

目前,透明陶瓷装甲材料的研究主要集中在单晶蓝宝石、多晶 AlON 或镁铝尖晶石等。其中,蓝宝石因其制备技术成熟在直升机透明件上应用最广泛。

中国航发北京航空材料研究院刘家希等^[122]回顾了陶瓷基透明防弹装甲的研究进展,认为蓝宝石材料是目前工艺最为成熟的迎弹面陶瓷材料,但其制造成本高昂且批次稳定性较差。相比之下,多晶陶瓷材料(如镁铝尖晶石和多晶 AlON)在生产大尺寸样品时具有更多可能性,但当前发展仍受限于高质量原料粉体的制备和烧结工艺。

3.1.2 能量转换部件用先进陶瓷材料

3.1.2.1 电能转换至机械能用先进陶瓷

在国内,基于压电陶瓷材料的智能旋翼技术研究起步较晚,随着国家对直升机和低空飞行器发展的关注加大,南京航空航天大学直升机系对智能旋翼技术开展了一系列研究,涉及驱动机构设计、振动控制仿真分析及算法、气动模型和风洞试验等。

南京航空航天大学直升机系杨卫东教授课题组^[123]为优化旋翼振动载荷对型号气动性能的影响,基于 NACA23912 翼型,采用进口 MFC 作为连续后缘襟翼驱动材料,设计制备了连续后缘襟翼智能旋翼模型桨叶,并建立了该模型桨叶的气弹动力学模型。南京航空航天大学韩冬教授课题组^[124]基于进口 MFC 设计制备了主动扭转型智能模型桨叶,并通过实验测定了其在不同电压驱动下的扭转角度。南京航空航天大学裘进浩教授课题组^[125-126]针对流延法制备 MFC 时存在的压电陶瓷薄片表面不平整和加工难度大的问题,提出了采用切割-填充法制备 MFC,并开展了基于该方法的 MFC 实验室小批试制。试制结果表明,采用该方法制备 MFC,可在实现压电陶瓷纤维整齐排列的同时确保压电陶瓷纤维表面平整。

3.1.2.2 机械能转换至电能用先进陶瓷

在所有飞行器中,直升机因具有旋翼、传动和发动机三大动部件,其振动问题最具危害性并带有全局性,在长期服役过程中难免会产生结构损伤。

如果无法及时监测和消除隐患,可能导致严重事故。现有的结构健康监测要求在型号中嵌入传感器和发射器,但这造成了系统的复杂性,并导致系统的冗余。虽然使用电池可以解决部分问题,但电池寿命有限,而且型号的部分位置更换电池困难,局限性较大。

在此背景下,南京航空航天大学、北京航空航天大学及中国飞行试验研究院等科研机构开展了基于新型光纤电子功能陶瓷材料的超低能量消耗的微型无线传感器和激励器网格技术研究,并采用关键压电陶瓷材料实现综合能量收集的自供电技术。南京航空航天大学邱雷等^[127]提出了一种结合回流焊技术与柔性印刷电路工艺制备可伸缩大规模导波传感器网络的方法,将压电陶瓷与柔性导线相结合。该传感器网络面积可以扩展到原始面积的 2500%,稳定激励和接收导波信号,用于监测直升机结构因振动诱发的损伤和冲击。北京航空航天大学李宇航等^[128]设计了一种基于共形传感器件的无线传输系统,该系统中的加速度监测器件已应用于发动机微型管路,并实时监测直升机的振动信息。中国飞行试验研究院闫蓉等^[129]基于新型压电铌镁酸铅-钛酸铅(PMN-PT)单晶材料,设计了微型压电振动能量收集装置,通过有限元仿真分析应力与构型,确保其在机载环境下满足使用要求。

3.1.2.3 电磁能/机械能至热能转换用先进陶瓷

随着目标特性探测技术及设备(如电、光、声技术)的快速发展,军用直升机面临着恶劣的作战环境。虽然直升机具备低空悬停和机动能力,但低速特性导致其在飞行空域中雷达暴露时间较长,易被高分辨率的雷达截获或识别。旋翼桨叶的几何尺寸和空间扫掠面积较大,是直升机的重要强散射源,其高速旋转导致雷达散射截面的动态非线性变化,并且伴随强烈微多普勒特征的雷达散射回波,易被敌方的雷达监测、识别和跟踪。

南京航空航天大学招启军教授团队^[130-132]聚焦于发展桨叶外形气动/雷达隐身一体化的旋翼多学科多目标优化设计平台,开展了大量直升机旋翼气动/雷达隐身特性的研究工作。研究结果显示,旋翼桨叶的雷达隐身与气动性能桨叶外形要求之间存在冲突,因此采用雷达吸波材料将是一种有效的补充手段。

中国航空制造技术研究院及南京航空航天大学等单位针对远程轰炸机的生存能力需求,研究了低频雷达吸波材料和耐高温吸波材料^[133-134]。哈尔滨工业大学特种陶瓷研究所团队联合国内相关优势单位,

回顾了空天飞行器高温吸波陶瓷材料研究进展^[135-136],指出磁损耗型吸波陶瓷、SiCN 介电吸波陶瓷与纤维增强吸波陶瓷基复合材料等,除适用于空天飞行器高耐磨、高耐温工况以外,也与直升机旋翼桨叶高速旋转、低能量冲击及湿热盐雾等复杂服役环境下的要求高度契合。

刹车系统是各类航空飞行器的重要组成部分,而刹车材料是其关键要素。为了确保飞行器刹车系统的稳定性和可靠性,刹车材料需具备足够的刹车力矩、良好的稳定性、适宜的刹车噪声和振动幅度、满足设计需求的使用寿命和热库体积容量以及一定的机械强度和力学性能。

目前,国内航空飞行器刹车材料以第三代 C/C 复合刹车材料为主,第四代 C/C-SiC 复合刹车材料正逐步拓展应用。主要研发单位包括中航制动、博云新材、中南大学、西北工业大学等,其中,中南大学和博云新材公司联合研制的 C/C 复合刹车材料已成功应用于 C919 大飞机起落架机轮等^[137],西北工业大学与中航制动联合研制的国内首例 C/C-SiC 刹车盘于 2009 年在某型号起落架机轮上实现了首飞^[138]。

3.1.3 直升机腐蚀防护区域用先进陶瓷材料

有机(聚合物)-无机(陶瓷)杂化复合涂层工艺简单且环保,适用于复杂形状和不同基材表面的耐磨高效腐蚀防护。北京航空航天大学、中国航发北京航空材料研究院、中国科学院化学研究所及哈尔滨工业大学等相关科研机构对此开展了大量有机-无机腐蚀防护涂层研究。

北京航空航天大学李松梅教授团队^[139]采用共沉淀法制备了 Zn-Al 层状双氢氧化物(LDH-V),并将其作为缓蚀剂掺杂到硅锆有机-无机杂化涂层中。结果显示 LDH-V 不仅提高了涂层的耐腐蚀性,而且为破损涂层提供了自修复功能,但高掺杂浓度的 LDH-V 会破坏涂层完整性,降低其耐腐蚀性。

中国航发北京航空材料研究院钟艳莉团队^[140]采用磁控溅射法在涂覆有底涂层的有机玻璃上制备氧化铟锡薄膜,并在薄膜表面涂覆光固化纳米复合涂层。结果表明,经过硅烷偶联剂处理的纳米 SiO₂ 粒子在涂层中分散良好,当纳米 SiO₂ 含量为 5%(质量分数)时,涂层硬度可达到 3H,耐磨性提高 67%。

中国科学院化学研究所邹铭等^[141]采用凝固诱导相分离方法制备了具有不同表面粗糙度的高透明、高耐久超疏水有机-无机杂化涂层,其在可见光范围(400~780 nm)内的平均透射率超过 85%,水接触角达到 155°,滑动角小于 1°,并且表现出良好的热稳定性和持久的超疏水性。

哈尔滨工业大学特种陶瓷研究所团队以直升机

结构连接紧固件与基材之间的电偶腐蚀防护为应用场景,制备了氧化锆基的有机-无机杂化涂层。该涂层明显提高了环氧底漆和 316 不锈钢之间的漆膜结合强度(最高提升 25%),所制备的纳米氧化硅改性聚氨酯和纳米氧化硅改性环氧树脂有机-无机杂化涂层展示出优异的柔韧性和耐磨性,并显著提升了 316 不锈钢、TC4 钛合金、7075 铝合金等金属的电化学和耐盐雾腐蚀性能。

3.2 差距分析

3.2.1 能量冲击防护用先进陶瓷材料

3.2.1.1 高速动态能量冲击防护用非透明装甲

当前,国内高速动态能量冲击防护用非透明装甲主要集中在应用于直升机驾驶舱座椅防护部位,装甲材料体系仍以 B₄C 陶瓷复合装甲材料的砖砌拼装结构为主。尽管 B₄C 陶瓷复合装甲材料在一定程度上满足了国内军用直升机的防护需求,但在面对更高的生存力和防弹性能需求时,需要轻质且成本效益更高的防护材料对关键部件进行有效防护。

因此,直升机非透明防弹装甲的最新研究主要集中在高性能陶瓷材料改性研究及新材料的研发、陶瓷复合装甲结构与材料协同优化等方向。研究重点包括:探索高性能陶瓷制备新方法和新技术,如梯度功能陶瓷、掺杂改性钝化陶瓷以及陶瓷与其他材料复合等;研究高性能陶瓷的低成本化制备技术,以提高大尺寸和复杂形状陶瓷的稳定性;深入研究陶瓷复合装甲防护机理,增强对弹击侵彻失效过程的模拟与分析能力,从而不断优化陶瓷复合装甲结构。

3.2.1.2 高速动态能量冲击防护用透明装甲

目前,陶瓷基透明防弹装甲的尺寸限制和形状复杂性是直升机驾驶舱高速动态能量冲击防护中的两大关键问题,单块透明陶瓷的尺寸往往无法满足型号实际需求,需要通过拼接方式扩大使用范围,这就增加了工艺复杂性和潜在的薄弱环节。此外,透明陶瓷装甲形状通常仅限于平板形态,限制了直升机驾驶舱防护区域设计的灵活性和防护效能。

为了克服这些挑战,直升机透明装甲未来研究方向将集中在制备工艺的改进上,以提高材料尺寸和形状的可控性,并探索新型透明陶瓷材料体系,以实现更高效、更灵活的直升机驾驶舱防护透明装甲解决方案。

综上,国内在高速动态能量冲击防护用产品的研究上与国外先进水平相比尚存在较大差距,同时在直升机装备高速动态冲击能量防护机理及防护材料抗弹击性能优化的基础研究方面也相对零散,与

国外系统化开展十余年的研究相比存在明显短板。

3.2.2 能量转换部件用先进陶瓷材料

3.2.2.1 电能转换至机械能用先进陶瓷

目前,国内基于进口 MFC 驱动的智能旋翼技术研究主要集中在模型桨叶的探索性研究上,所用的 d_{33} 型 MFC 材料如 M2814-P1 和 M8557-P1 均为德国 Smart Materials 公司进口。且现阶段技术尚未达到直升机工业界进行旋翼塔验证试验的技术成熟度,与国外先进水平差距较大。

虽然国内部分高校开展了进口 MFC 的国产化工作,但这些技术仍局限在小尺寸实验室制备,且实验室制备小样的封装和弯曲性能与进口 MFC 仍存在差距。因此,亟需基于型号需求,联合国内直升机工业界及相关材料研发单位,组建产学研联合团队,寻求国家专项支持,以推动高性能 MFC 材料的国产化及应用验证。

3.2.2.2 机械能转换至电能用先进陶瓷

目前,国内在微型压电陶瓷材料用于传感器、控制器和激励器等薄膜器件的制备方面相对成熟,关于微型压电陶瓷能量收集器的研究也有诸多报道。但基于微型压电陶瓷薄膜器件的直升机 SPWSN HUMS 的建设方案尚在论证中,与国外已进入型号应用的直升机 SPWSN HUMS 相比仍存在差距。

然而,基于微型压电陶瓷材料的薄膜器件与结构材料的复合仍处于实验室小样制备的原理性探索阶段,尚在进行与结构材料的集成方案论证。这与实现直升机动部件结构状态自动感知的目标仍有较大差距,且与国外已基于背景型号开展技术验证也存在较大差距。因此,亟需联合国内相关优势单位,围绕未来垂直起降飞行器关键部件“无疲劳”及“零维护”的目标和疲劳性能精准预测的现实需求,开展专项技术规划和攻关研究。

3.2.2.3 电磁能/机械能至热能转换用先进陶瓷

根据文献[142],国内在直升机旋翼用吸波涂层方面的研究主要聚焦于雷达吸波涂层的位置、厚度及电磁频率等对旋翼电磁散射特性的影响,着重实现隐身功能,而对涂层在旋翼桨叶高速旋转、低能量冲击及湿热盐雾复杂服役环境下的功能耐久性关注不足。因此,未来应致力于发展平衡隐身功能和耐久性的纤维增强吸波陶瓷基复合材料蒙皮技术。

直升机旋翼刹车装置(最大转速 3200 r/min)与机轮刹车装置(885 r/min)之间的转速差异显著^[143],至今尚无 C/C-SiC 复合刹车材料在国产直升机旋翼刹车装置上的应用报道,与国外已在该领域进行实验应用相比尚存在较大差距。

3.2.3 直升机腐蚀防护区域用先进陶瓷材料

目前,国内在航空飞行器结构上应用有机(聚合物)-无机(陶瓷)杂化复合涂层,主要是为了提升钛合金和不锈钢等难黏金属的腐蚀防护涂层结合力。应用于紧固件表面,以抑制紧固件材质与飞机机身不同基材之间电偶腐蚀的有机(聚合物)-无机(陶瓷)杂化复合涂层正处于材料工程化考核验证阶段,与国外在海军航空飞行器连接结构腐蚀防护方面已实现批量化应用相比,仍存在显著差距。

综上,经过 70 多年的技术发展,国产直升机装备已基本构建牌号齐全且可立足于国内自主保障的铝、钢、钛和复合材料等结构材料体系。然而,针对未来垂直起降飞行器在电动化、智能化、绿色环保和低成本应用方面的需求,轻质陶瓷-韧性材料复合及微型压电陶瓷多功能材料的研究尚处于实验室小样制备的原理性探索阶段。同时,国内长期重材料研制、轻材料应用,新材料开发与实际装备需求长期割裂,这导致未来垂直起降飞行器智能化发展所需的新型特种功能材料关键技术储备不足。

特别是以信息功能陶瓷材料为核心的智能材料,在智能服饰、智能手机等高端市场快速发展,几乎以每 3 年隔代发展的技术代差形式快速迭代。但在垂直起降飞行器为代表的航空飞行器结构智能监测等领域,必须通过严苛的机械性能、功能性能和耐环境性能等综合考核验证^[144]。如何破解智能材料与航空飞行器应用考核之间的周期匹配问题,避免技术应用滞后是亟待解决的课题。

4 直升机用陶瓷材料技术展望和需求预测

根据国外先进高性能陶瓷材料发展趋势及国内外直升机先进高性能陶瓷材料应用的差距,预测了未来垂直起降飞行器先进陶瓷材料在能量冲击防护部位、能量转换部件和腐蚀防护区域的需求。

4.1 能量冲击防护部位

针对包括乘员座椅、油路管路系统及座舱透明件等在内的直升机高速动态能量冲击部位,需持续提升陶瓷材料的防护效率和制备效率,建立陶瓷防护材料组分、制备工艺、显微结构、宏观力学性能与弹击防护失效机理之间的映射关系。重点研究直升机装备高速动态能量冲击防护机理及防护材料抗弹击性能优化机制,并基于此,指导反应烧结可曲面一体化成型的非透明装甲陶瓷材料和多晶透明装甲陶瓷材料的快速研发,在确保结构质量效率可控

的前提下,提升未来垂直起降飞行器的战场生存力。

针对旋翼桨叶前缘防护等低能量冲击防护部位,应发展兼具轻质、金属材料的韧性和导电性及陶瓷材料的硬度和抗冲击性多重优势的金属陶瓷复合涂层,且明确该涂层的施工方式不会对复合材料或轻合金结构基材产生热损伤和冲击损伤,以满足该防护部位雷击、沙尘和雨滴等低能量冲击以及轻质高效综合防护性能和工艺施工性的需求。

对易暴露于发动机高温废气侵袭环境的直升机发动机整流罩和尾段蒙皮等热能冲击防护部位,应发展陶瓷基/树脂基混杂复合材料,优化热防护层寄生厚度和结构附加质量,以确保蒙皮承载层树脂基复合材料的结构完整性。

4.2 能量转换部件

针对直升机智能旋翼和关键结构 SPWSN HUMS 等能量转换部件的迫切需求,应研发以基于微型压电陶瓷材料的柔性混合电子结构复合材料为代表的多功能复合材料,以实现能量收集器、传感器、控制器和激励器与现有结构承载材料的有机结合,满足未来垂直起降飞行器智能旋翼和“无疲劳”及“零维护”发展目标的需求。

针对多功能复合材料技术飞速迭代发展与航空飞行器关键部位应用考核周期过长导致材料技术滞后的突出矛盾,应发展基于模型的系统工程方法 (Model-based System Engineering, MBSE)支撑的垂直起降飞行器多功能复合材料数字试验验证技术,精准量化多功能复合材料虚实结合的指标需求,以实现高效低成本装机验证。

4.3 腐蚀防护区域

基于有机-无机杂化复合涂层工艺简单和绿色环保的优异特性,后续工作将重点拓展溶胶-凝胶涂层

在舰载直升机起落架套筒等复杂形状部件和基材表面的高效耐磨腐蚀防护应用。

直升机特定结构部位对先进陶瓷材料的需求如表 5 所示。由表 5 可知,能量冲击防护部位、能量转换部件及腐蚀防护区域为代表的特定结构部位,对反应烧结可曲面一体化成型的非透明装甲陶瓷、多晶透明装甲陶瓷、可与环氧树脂基基材兼容的金属陶瓷复合涂层、陶瓷基/树脂基混杂复合材料、高性能微型压电陶瓷薄膜功能器件、柔性混合电子结构复合材料、与环氧树脂基复合材料兼容的纤维增强吸波陶瓷基复合材料、新一代高性能耐磨腐蚀防护用溶胶-凝胶涂层等先进陶瓷材料,均存在持续且迫切的需求。同时,需要大力构建直升机装备高速动态能量冲击防护机理,以及防护材料抗弹击性能优化机制,发展 MBSE 支撑的垂直起降飞行器多功能复合材料数字试验验证技术,以实现上述先进陶瓷材料的快速研发和在直升机特定结构部位的上装应用。

表 5 列出的直升机特定结构部位所需的先进陶瓷材料,国内技术成熟度各不相同。例如,多晶透明装甲陶瓷及溶胶-凝胶涂层等大多数先进陶瓷材料在研制和供应侧均已相对成熟,后续将在直升机特定结构部位需求侧开展应用验证以及材料改进等多轮迭代的工程化工作。但是,直升机关键结构状态自感知、自激励所需的柔性混合电子结构复合材料等多功能智能复合材料仍处于起步探索阶段。

图 14 展示了技术成熟度相对较低的直升机复杂服役环境结构状态自感知、自激励智能材料现状和挑战以及关键技术突破所需的研发周期。针对微型压电陶瓷存在的驱动电压过高、能量转换效率和许用应变偏低等问题,在 2027 年前,需突破低驱动电压、

表 5 特定结构部位先进陶瓷材料需求
Table 5 Demands for advanced ceramic materials in specific structural components

Area or site	Structure component	Demand for advanced ceramic material
Energy impact protection areas	High energy impact protection components, such as occupant seats	Reaction bonding of complex-shaped and monolithic opaque armor ceramics, transparent polycrystal armor ceramics
	Low energy impact protection components, such as leading edge of rotor blades	Compound coating of metal and ceramics
	Heat energy impact protection components, such as engine cowling	Hybrid ceramic matrix composite/polymer matrix composite materials
Energy conversion sites	Mechanical and electrical energy conversion components, such as smarting rotor	Flexible hybrid electronic-structural composites
	Electromagnetic and heat energy conversion components, such as rotor blades	Microwave-absorbing ceramic composites made of polymer-derived ceramics
Corrosion protection areas	Landing gear sleeves	High-performance Sol-Gel coating

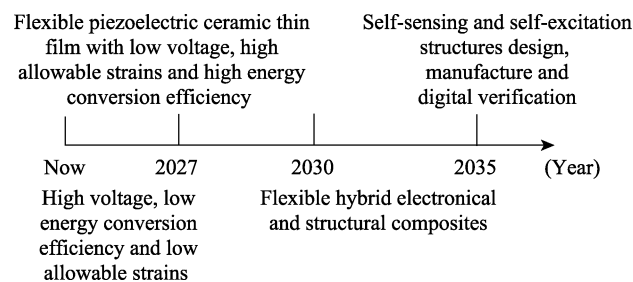


图14 自感知、自激励智能材料现状和关键技术发展规划
Fig. 14 Status and development plan of key technology for self-sensing and self-excitation smart materials

高韧化可弯折陶瓷及高许用应变和高能量转换效率的柔性微型压电陶瓷薄膜器件工程化制备技术, 并将其应用于直升机SPWSN HUMS; 在2030年前, 需实现基于柔性微型压电陶瓷薄膜器件与结构材料复合的柔性混合电子结构复合材料制备, 并成功验证其结构承载性能和能量转换性能; 在2035年前, 需完成基于柔性混合电子结构复合材料的状态自感知、自激励结构设计, 以及制备和数字化验证, 并进行批量化装机应用。

参考文献:

- [1] HWANG C, DU J, YANG Q R, *et al.* Addressing amorphization and transgranular fracture of B_4C through Si doping and TiB_2 microparticle reinforcing. *Journal of the American Ceramic Society*, 2022, **105**(5): 2959.
- [2] SHEN Y D, YANG M Y, GODDARD W A, *et al.* Strengthening boron carbide by doping Si into grain boundaries. *Journal of the American Ceramic Society*, 2022, **105**(5): 2978.
- [3] YANG Q R, ÇELİK A M, DU J, *et al.* Advancing the mechanical properties of Si/B Co-doped boron carbide through TiB_2 reinforcement. *Materials Letters*, 2020, **266**: 127480.
- [4] GAO J L, FEZZAA K, CHEN W N. Multiscale dynamic experiments on fiber-reinforced composites with damage assessment using high-speed synchrotron X-ray phase-contrast imaging. *NDT & E International*, 2022, **129**: 102636.
- [5] GAO J L, KEDİR N, KIRK C D, *et al.* High-speed synchrotron X-ray phase-contrast imaging for evaluating microscale damage mechanisms and tracking cracking behaviors inside cross-ply GFRCS. *Composites Science and Technology*, 2021, **210**: 108814.
- [6] PRAMEELA S E, YI P, HOLLENWEGER Y, *et al.* Strengthening magnesium by design: integrating alloying and dynamic processing. *Mechanics of Materials*, 2022, **167**: 104203.
- [7] University of Bristol. Shape Adaptive Blades for Rotorcraft Efficiency—SABRE project. (2021-04-13)[2024-11-13]. <https://sabreproject.eu>.
- [8] Hybrid ceramic matrix composites/polymer matrix composite skin materials. Triton Systems Inc. Department of the Navy SBIR/STTR Transition Program. ONR Approval#43-8692-21.
- [9] HAYUN S. Reaction-bonded boron carbide for lightweight armor: the interrelationship between processing, microstructure, and mechanical properties. *American Ceramic Society Bulletin*, 2017, **96**(6): 20.
- [10] RAMISETTY M, SASTRI S, KASHALIKAR U, *et al.* Transparent polycrystalline cubic spinels protect and defend. *American Ceramic Society Bulletin*, **92**(2): 20.
- [11] RUSSELL K, GERSTNER N, KRAMMER M, *et al.* CH-53K heavy lift helicopter—a survivability focused design. American Helicopter Society International Annual Forum, Virginia, 2011.
- [12] MARTIN R, GOFF A, KOENE B, *et al.* Durable, hydrophobic surface treatment for enhanced corrosion protection of landing gear. DOD-Allied Nations Technical Corrosion Conference, Virginia, 2022: 19611.
- [13] ZELENKA S, HADAS Z, BADER S, *et al.* Energy harvesting technologies for structural health monitoring of airplane components—a review. *Sensors*, 2020, **20**(22): 6685.
- [14] LEE H, ZHANG S J, BAR-COHEN Y, *et al.* High temperature, high power piezoelectric composite transducers. *Sensors*, 2014, **14**(8): 14526.
- [15] SINEM S M, LEVENT U. Vibration reduction in a helicopter using active twist rotor blade method. 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences, Saix, 2017.
- [16] ZHU D M. Aerospace ceramic materials: thermal, environmental barrier coatings and SiC/SiC ceramic matrix composites for turbine engine applications. (2018-05-01)[2024-11-13]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20180002984>.
- [17] 邓景辉. 直升机技术与展望. *航空科学技术*, 2021, **32**(1): 10.
- [18] DARMSTADT P R, ROBUCK M J, MOORE R F *et al.* Composites for advanced drive system, a systems analysis—revolutionary vertical lift technology (RVLT). NASA/CR—2019-220237.
- [19] 吴希明, 牟晓伟. 直升机关键技术及未来发展与设想. *空气动力学学报*, 2021, **39**(3): 1.
- [20] 吕春雷, 黄利. 下一代直升机技术发展方向研究. *航空制造技术*, 2016, **59**(8): 51.
- [21] HISCHBERG M. The future of vertical flight. 75th American Helicopter Society Annual Forum, Pennsylvania, 2019.
- [22] 宋焕成, 梁志勇, 张佐光. 武装直升机与陶瓷/复合材料装甲. *航空制造工程*, 1994(9): 9.
- [23] MARRONE A, ROCCA G L. Future military helicopters: technological innovation and lessons learned from Ukraine. Istituto Affari Internazionali, Rome.
- [24] 陈晓楠, 韩志文, 褚世永. 俄乌冲突中俄空军直升机运用对直升机装备建设的启示. *指挥控制与仿真*, 2023, **45**(6): 19.
- [25] WILLIAM A. Rotary wing (RW) mishaps in DVE: latest statistics. EN-HFM-265-01. Florida, NATO Science and Technology Organization, 2017.
- [26] NAMPY S N, SMITH E, BAKIS C. Advanced grid-stiffened composite shells for heavy-lift helicopter blade spars. 55th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Reston, 2014.
- [27] MESTRE V, SCHOMER P, LIU K. Helicopter noise information for airports and communities. Washington: National Academies Press, 2016.
- [28] 路录祥, 王江河. 直升机降噪技术. 第十六届全国直升机年会, 南京, 2000.
- [29] FULLER R M. Adaptive noise reduction techniques for airborne acoustic sensors. Dayton: Wright State University, 2012.
- [30] 刘芙群, 顾仲权. 智能旋翼——直升机减振降噪的治本技术. *国际航空*, 2001(8): 24.
- [31] 刘孝辉, 徐新喜, 白松, 等. 军用直升机振动与噪声控制技术. *直升机技术*, 2013(1): 67.
- [32] 冯剑波, 陆洋. 直升机旋翼桨毂干扰噪声主动控制技术综述. *噪声与振动控制*, 2018, **38**(3): 1.
- [33] KIM J, LEE J K. Broadband transmission noise reduction of smart panels featuring piezoelectric shunt circuits and sound-absorbing

- material. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, **112**(3): 990.
- [34] SOU U T. Investigation into the effects of blade tip twist on noise reduction for a NACA 0012 rotor blade. *McNair Research Journal SJSU*, 2019, **15**(1): 121.
- [35] LEIF A. Damage tolerance and durability of structural power composites. AFRL-AFOSR-UK-TR-2021-0013.
- [36] 刘天一, 张汉鸿, 杨禹. 高耐热陶瓷涂覆锂离子电池隔膜研究进展. *广东化工*, 2021, **48**(8): 137.
- [37] 崔腾飞, 高蒙, 胡建清, 等. 海洋环境对直升机基础产品腐蚀行为影响研究. *装备环境工程*, 2023, **20**(5): 19.
- [38] 张黎明, 张继垒. 舰载直升机旋翼迎风面防护技术研究进展. *装备环境工程*, 2023, **20**(7): 63.
- [39] GOFF A, SPRINKLE C, MARTIN R, *et al.* Durable Sol-Gel surface treatment to mitigate galvanic corrosion. Department of Defense Allied Nations Technical Corrosion Conference, Virginia, 2019.
- [40] CHARLES T W, THOMAS M H, DONALD F, *et al.* Characterization of ALONTM optical ceramic. SPIE Defense and Security Symposium, Orlando, 2005.
- [41] KARANDIKAR P G, AGHAJANIAN M K, AGRAWAL D, *et al.* Microwave assisted (mass) processing of metal-ceramic and reaction-bonded composites//Ceramic Engineering and Science Proceedings. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2008.
- [42] HACKLER D. Complex flexible hybrid electronic labels. 2018FLEX Session 9.1: Flexible Electronics Applications, Milpitas, 2018.
- [43] Air Force Sustainment Center. Durable rain-repellent coatings for aircraft transparencies. Air force SBIR/STTR program, 2017.
- [44] ANTIFORAL A, TOULMAY F. CLEAN SKY—the green rotorcraft integrated technology demonstrator-state of play three years after kick-off. 37th European Rotorcraft Forum, Ticino Park, 2011.
- [45] KÜFMANN P M, BARTELS R, WALL B G, *et al.* The second wind-tunnel test of DLR's multiple swashplate system. *CEAS Aeronautical Journal*, 2019, **10**(2): 385.
- [46] KALOW S, KAMP V D, KEIMER B, *et al.* Next generation active twist helicopter rotor blade—simulated results validated by experimental investigation. 45th European Rotorcraft Forum, Warsaw, 2019.
- [47] DEAS T. Aircraft survivability advances against hard to detect small arms, RPG and MANPADS threats. 68th American Helicopter Society Annual Forum, Fort Worth TX, 2012.
- [48] AYLWORTH W. The evolving threat & operational environment's impact on aircraft vulnerability reduction. 74th AHS International Annual Forum & Technology Display, Phoenix Arizona, 2018.
- [49] CHAIT R, LYONS J, LONG D. Critical technology events in the development of the Apache helicopter. ADA450121. 2006.
- [50] COUCH M, LINDELL D. Study on rotorcraft safety and survivability. 66th American Helicopter Society Annual Forum, Phoenix, 2010.
- [51] PORTANOVA M A, DELMONT R M, BRESLIN M C. Critical component protection (CCP) increased vulnerability reduction for rotorcraft. *Aircraft Survivability Journal*, 2013.
- [52] PATTERSON M C L, DIGIOVANNI A, FERENBACHLER L, *et al.* Spinel: gaining momentum in optical applications. Proc. SPIE 5078, Window and Dome Technologies VIII, Bellingham, 2003.
- [53] JHA S K, SOHN Y H, SASTRI S, *et al.* Al—O—N based duplex coating system for improved oxidation resistance of superalloys and NiCrAlY coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2004, **183**(2/3): 224.
- [54] HARTNETT T M, BERNSTEIN S D, MAGUIRE E A, *et al.* Optical properties of ALON (aluminum oxynitride). *Infrared Physics & Technology*, 1998, **39**(4): 203.
- [55] PARIMAL J P, HSIEH A J, GILDE G A. Improved low-cost multi-hit transparent armor. ADA481074. U.S. Army Research Laboratory, 2006.
- [56] Automotive tank purchase description: purchase description-transparent armor. ATPD 2352R. 2010.
- [57] PORTANOVA M A, DELMONT R M, BRESLIN M C. Development of multiple impact transparent armor systems. *Aircraft Survivability Journal*, 2013.
- [58] Johns Hopkins Extreme Materials Institute. CMEDE (Center for materials in extreme dynamic environments) research. (2022-07-16) [2024-11-13]. <https://hemi.jhu.edu/cmede/wp-content/uploads/2022/07/MBD-process-2022>.
- [59] HWANG C, DIPIETRO S, XIE K Y, *et al.* Small amount TiB₂ addition into B₄C through sputter deposition and hot pressing. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, **102**(8): 4421.
- [60] MCCAULEY J W. Institutional and technical history of requirements-based strategic armor ceramics basic research leading up to the multiscale material by design materials in extreme dynamic environments (MEDE) program. Part I. Brief history of institutional changes and relevant major research programs. *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, 2023, **5**(3): e10176.
- [61] WEIGEL W D. Advanced rotor blade erosion protection system. ADA314355. Aviation Applied Technology Directorate, 1996.
- [62] THOMAS W A, HONG S C, YU C Y, *et al.* Enhanced erosion protection for rotor blades. 65th American Helicopter Society Annual Forum, Texas, 2009.
- [63] Rotor blade erosion protection manual. Technical Bulletin. TB 1-1615-351-23.
- [64] HONG S C. Hontek HC05XP1 VS. 3M Tape. Comparison of hydrolysis resistance and others. A White Paper, 2010.
- [65] Leading edge protective coating against fluid and particulate erosion for turbofan blades. (2020-05-11)[2024-09-05]. https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/about/office_org/headquarters_offices/apl/delta-mds_0520.pdf.
- [66] America's Phenix Inc. Leading edge protective coating against fluid and particulate erosion for turbofan blades. (2019-11-21) [2024-09-05]. https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/about/office_org/headquarters_offices/apl/mds_delta.pdf.
- [67] MDS Coating Technologies Corporation. MDS coating technologies announces new trade name for coating family BlackGold™. News Release, 2012.
- [68] NASLAIN R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview. *Composites Science and Technology*, 2004, **64**(2): 155.
- [69] WILSON D M, VISSER L R. High performance oxide fibers for metal and ceramic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2001, **32**(8): 1143.
- [70] MISRA A. Advanced ceramic materials for future aerospace applications. 39th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites, Daytona, 2015.
- [71] NGUYEN K, CHOPRA I. Effects of higher harmonic control on rotor performance and control loads. *Journal of Aircraft*, 1992, **29**(3): 336.
- [72] JOHNSON W. Recent development in dynamics of advanced rotor systems part. *Vertica*, 1986, **10**(11): 73.
- [73] KINZEL M P, MAUGHMER M D, LESIEUTRE G A. Miniature trailing-edge effectors for rotorcraft performance enhancement. *Journal of the American Helicopter Society*, 2007, **52**(2): 146.
- [74] YOU Y, JUNG S N. Optimum active twist input scenario for performance improvement and vibration reduction of a helicopter rotor. *Aerospace Science and Technology*, 2017, **63**: 18.
- [75] CHOPRA I. Status of application of smart structures technology to

- rotorcraft systems. *Journal of the American Helicopter Society*, 2000, **45**(4): 228.
- [76] CHOPRA I. Review of state of art of smart structures and integrated systems. *AIAA Journal*, 2002, **40**: 2145.
- [77] SCHWARTZ R W, BALLATO J, HAERTLING G H. Piezoelectric and electro-optic ceramics//BUCHANAN R C. Ceramic Materials for Electronics. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2017.
- [78] STRAUB F K, ANAND V R, BIRCHETT T S, *et al.* Smart rotor development and wind tunnel test. Proceedings of the 35th European Rotorcraft Forum, Hamburg, 2009.
- [79] HAGERTY B, KOTTAPALLI S. Boeing SMART rotor full scale wind tunnel test data report. NASA/TM-2012-216048.
- [80] DIETETICH O, ENENKL B, ROTH D. Trailing edge flaps for active rotor control aeroelastic characteristics of the ADASYS rotor system. American Helicopter Society 62nd Annual Forum Proceedings, Phoenix, 2006.
- [81] ROTH D, ENENKL B, DIETETICH O. Active rotor control by flaps for vibration reduction-full scale demonstrator and first flight test results. Proceedings of 32nd European Rotorcraft Forum, Maastricht, 2006.
- [82] CEDRAT TECHNOLOGIES. Products Catalog Version 4.1. 4.11 Amplified piezoelectric actuators APA XL series.
- [83] WILLIAMS R B, GRIMSLEY B W, INMAN D J, *et al.* Manufacturing and mechanics-based characterization of macro fiber composite actuators. ASME 2002 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New Orleans, 2008.
- [84] SHEN J, THORINBURGH R P, KRESHOCK A R, *et al.* Preliminary design and evaluation of an airfoil with continuous trailing-edge flap. AHS Future Vertical Lift Aircraft Design Conference, San Francisco, 2012.
- [85] THORINBURGH R P, KRESHOCK A R, WILBUR M L, *et al.* Continuous trailing-edge flaps for primary flight control of a helicopter main rotor. Proceedings of the 70th Annual Forum of the American Helicopter Society, Montreal Quebec, 2014.
- [86] SHEN J, THORINBURGH R P, LIU Y, *et al.* Design and optimization of an airfoil with active continuous trailing-edge flap. Proceedings of the 69th Annual Forum of the American Helicopter Society, Phoenix, 2013.
- [87] CARLOS E S, CESNIK S S, WILKIE W K, *et al.* Modeling design and testing of the NASA/ARMY/MIT active twist rotor prototype blade. American Helicopter Society 55th Annual Forum, Montreal, 1999.
- [88] PARK J S, KIM J H. Design and aeroelastic analysis of active twist rotor blades incorporating single crystal macro fiber composite actuators. *Composites Part B: Engineering*, 2008, **39**(6): 1011.
- [89] WIERACH P, RIEMENSCHNEIDER J, OPITZ S, *et al.* Experimental investigation of an active twist model rotor blade under centrifugal loads. Heidelberg: Springer, 2012.
- [90] Research topics in aerospace: adaptive, tolerant and efficient composite structures. Heidelberg: Springer, 2012.
- [91] HOFFMANN F, SCHNEIDER O, WALL V D, *et al.* STAR hovering test—proof of functionality and representative results. 40th European Rotorcraft Forum, Southampton, 2014.
- [92] WIERACH P, OPITZ S, KALOW S. Experimental investigation of an active twist model rotor blade with a low voltage actuation system. *The Aeronautical Journal*, 2015, **119**(1222): 1499.
- [93] KALOW S, KAMP V D, RIEMENSCHNEIDER J, *et al.* Experimental investigation and validation of structural properties of a new design for active twist rotor blades. 43rd European Rotorcraft Forum, Milan, 2017.
- [94] KALOW S, KAMP V D, RIEMENSCHNEIDER J, *et al.* Manufacturing of a next generation active twist helicopter rotor blade and experimental results of functionality test. American Helicopter Society 74th Annual Forum, Phoenix, 2018.
- [95] WALL B G, LIM J W, RIEMENSCHNEIDER J, *et al.* New smart twisting active rotor (STAR): pretest predictions. *CEAS Aeronautical Journal*, 2024, **15**(3): 721.
- [96] LIN M, CHANG F K. The manufacture of composite structures with a built-in network of piezoceramics. *Composites Science and Technology*, 2002, **62**(7/8): 919.
- [97] WILDSCHKE A, STORM S, HERRING M, *et al.* Design, optimization, testing, verification, and validation of the wingtip active trailing edge/Smart intelligent aircraft structures (SARISTU). Cham: Springer International Publishing, 2015.
- [98] LOVERICH J, FRANK J, SZEFI J, *et al.* Rotary wing dynamic component structural life tracking with self-powered wireless sensors. American Helicopter Society 66th Annual Forum, Phoenix, 2010.
- [99] SHI Y, HALLETT S R, ZHU M L. Energy harvesting behaviour for aircraft composites structures using macro-fibre composite: part I—integration and experiment. *Composite Structures*, 2017, **160**: 1279.
- [100] STEVEN W A, CHRISTOPHER P T, CHURCHILL D L, *et al.* Tracking pitch link dynamic loads with energy harvesting wireless sensors. American Helicopter Society 63rd Annual Forum, Virginia, 2007.
- [101] THOMAS L, CHRISTOPHER P T, *et al.* Energy harvesters for rotorcraft wireless sensor networks. 8th DSTO International Conference on Health & Usage Monitoring, Geelong, 2013.
- [102] DANIEL M W, FRATTINI T, CHURCHILL D L. Development of a helicopter on-rotor HUM system powered by vibration energy harvesting. 40th European Rotorcraft Forum, Milan, 2014.
- [103] MOORE D. Energy harvesting, wireless structural health monitoring system for helicopter rotors. Navy SBIR, 2013, SBIR contract No. N68335-13-C-0320.
- [104] MENDOZA E, KEMPEN C, ESTERKIN Y, *et al.* Energy harvesting, wireless fiber optic sensor (WiFOS™) structural health monitor system for helicopter rotors. 16th Australian International Aerospace Congress, Melbourne, 2015.
- [105] MOORE D. Low power, low cost, lightweight, multichannel optical fiber interrogation unit for structural health management of rotor blades. Navy SBIR, 2015, SBIR contract No. 68335-16-C-0340.
- [106] MENDOZA E A, ESTERKIN Y, ANDREAS T. Low power, low cost, lightweight, multichannel optical fiber interrogation system for structural health management of rotor blades. 18th Australian International Aerospace Congress, Melbourne, 2019.
- [107] ATTICK D. Integrated hybrid structural health monitoring (SHM) system. Navy SBIR, 2016, SBIR contract No. N68335-18-C-0242.
- [108] GRACE N. North Carolina State University develops CFRP skin for stealth aircraft. *Composite World*, 2021, **7**(9): 18.
- [109] JIA Y J, CHOWDHURY M A R, ZHANG D J, *et al.* Wide-band tunable microwave-absorbing ceramic composites made of polymer-derived SiOC ceramic and *in situ* partially surface-oxidized ultra-high-temperature ceramics. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, **11**(49): 45862.
- [110] JIA Y J, AJAYI T D, ROBERTS M A, *et al.* Ultrahigh-temperature ceramic-polymer-derived SiOC ceramic composites for high-performance electromagnetic interference shielding. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, **12**(41): 46254.
- [111] JIA Y J, AJAYI T D, WAHLS B H, *et al.* Multifunctional ceramic composite system for simultaneous thermal protection and electromagnetic interference shielding for carbon fiber-reinforced polymer composites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, **12**(52): 58005.
- [112] KUMAR P, SRIVASTAVA V K. Tribological behaviour of C/C—SiC composites—a review. *Journal of Advanced Ceramics*, 2016, **5**(1): 171.

- [113] Airbus Corporation. Airbus approval suppliers list, 2024.
- [114] Collins Aerospace (Ratier-Figeac). Brakes (Rotor Brakes). (2020-06-23)[2024-11-13]. <https://ratier-figeac.fr/en/nos-produits/>.
- [115] Department of the Army. Army science and technology for army aviation 2025—2040. Army science board fiscal year 2015 study, Arlington, 2015.
- [116] LE D, RIDDICK J C, WEISS V. “Fatigue-free” platforms: vision for army future rotorcraft. American Helicopter Society 70th Annual Forum, Montreal, 2014.
- [117] DEWIND E, SOPKO R. Prognostics framework to enable a maintenance free operating period. Vertical Flight Society’s 77th Annual Forum & Technology Display, Virtual, 2021.
- [118] 武岳, 王旭东, 刘迪, 等. 直升机陶瓷复合装甲发展现状及新型材料应用前景. 航空材料学报, 2019, **39**(5): 34.
- [119] WANG B, CAI D L, LI S Q, *et al.* Effect of B₄C particle size and TiB₂ content on the mechanical properties of B₄C composites and their dynamic mechanical properties. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2024, **21**(1): 438.
- [120] WANG B, CAI D L, WANG H Y, *et al.* Microstructures and mechanical properties of B₄C–SiC and B₄C–SiC–TiB₂ ceramic composites fabricated by hot pressing. *Journal of the American Ceramic Society*, 2023, **106**(8): 5046.
- [121] WANG B, CAI D L, XUE C Y, *et al.* Preparation and mechanical properties of laminated B₄C–TiB₂/BN ceramics. *Ceramics International*, 2021, **47**(22): 31214.
- [122] 刘家希, 石晓东, 姜良宝, 等. 陶瓷基透明防弹装甲研究进展. 材料工程, 2021, **49**(11): 30.
- [123] 李赞. 基于 MFC 的连续后缘襟翼设计与旋翼振动载荷影响分析. 南京: 南京航空航天大学硕士学位论文, 2018.
- [124] 王雪枫. MFC 驱动的智能扭转旋翼模型桨叶研制. 南京: 南京航空航天大学硕士学位论文, 2021.
- [125] 姚俊唯. PMN-PZT 系陶瓷与 MFC 压电驱动器的制备及性能研究. 南京: 南京航空航天大学硕士学位论文, 2017.
- [126] 张晓宝. 改性 PMN-PZT 压电陶瓷及其柔性 MFC 驱动器的制备与性能研究. 南京: 南京航空航天大学硕士学位论文, 2018.
- [127] WANG Y, QIU L, LUO Y J, *et al.* A stretchable and large-scale guided wave sensor network for aircraft smart skin of structural health monitoring. *Structural Health Monitoring*, 2021, **20**(3): 861.
- [128] HE Z, WANG K, ZHAO Z, *et al.* A wearable flexible acceleration sensor for monitoring human motion. *Biosensors*, 2022, **12**(8): 620.
- [129] 闫蓉, 李凯. 基于关键压电材料的直升机振动能量收集装置仿真分析. 中国科技信息, 2020(6): 39.
- [130] 蒋相闻, 招启军, 孟晨. 直升机旋翼桨叶外形对雷达特征信号的影响. 航空学报, 2014, **35**(11): 3123.
- [131] 蒋相闻, 招启军. 考虑旋翼调制影响的直升机 RCS 特性分析及评估. 航空动力学报, 2014, **29**(4): 824.
- [132] 蒋相闻. 直升机气动/雷达隐身特性综合优化设计及应用. 南京: 南京航空航天大学博士学位论文, 2016.
- [133] 韩敏阳, 韦国科, 周明, 等. 低频雷达吸波材料的研究进展. 复合材料学报, 2022, **39**(4): 1363.
- [134] 徐俊杰, 王岭, 王晓猛, 等. 耐高温吸波材料的研究进展. 现代技术陶瓷, 2024, **45**(3): 189.
- [135] 陈政伟, 黄小萧, 贾德昌, 等. 高温吸波陶瓷材料研究进展. 现代技术陶瓷, 2020, **4**(1/2): 1.
- [136] WANG L, DUAN X M, LIU S J, *et al.* Synergistic microwave absorption effect of graphene-BN-Fe₃O₄ composite at thin thickness. *Applied Surface Science*, 2024, **675**: 160959.
- [137] 迟波, 于博. 碳/碳复合材料的发展及应用研究. 纤维复合材料, 2023, **40**(4): 76.
- [138] 周一帆, 陆贤坤, 刘海平, 等. 航空刹车材料发展概述. 化工设计通讯, 2020, **46**(6): 86.
- [139] 李松梅, 尹晓琳, 刘建华, 等. Zn-Al-[V₁₀O₂₈]⁶⁻ 双层氢氧化物掺杂对 LY12 铝合金表面溶胶-凝胶涂层性能的影响. 物理化学学报, 2014, **30**(11): 2092.
- [140] 张旋, 钟艳莉, 颜悦, 等. 聚碳酸酯透明材料表面耐磨涂层的纳米力学性能和耐磨性研究. 材料工程, 2014, **42**(1): 79.
- [141] 邹铭, 周晓龙, 黄文文, 等. 金属表面预处理用聚硅氮烷转化膜技术. 涂料工业, 2020, **50**(4): 19.
- [142] 战帅, 吕晓林, 陈翔宇, 等. 吸波涂层对直升机旋翼电磁散射特性影响研究. 舰船电子工程, 2024, **44**(7): 190.
- [143] 白钧生, 王靖, 李碧波, 等. 多类型航空刹车器件性能试验台设计. 机床与液压, 2023, **51**(23): 155.
- [144] SEZNEC M, IVANOFF J G. RACER COUMPOUND helicopter: operational wireless FTI data transfer from rotor up to fuselage. AHS International 78th Annual Forum & Technology Display, Fort Worth, 2022.